

**UNIVERSITEIT ANTWERPEN**

**FACULTEIT TOEGEPASTE ECONOMISCHE WETENSCHAPPEN**

# **Radkowsky Thorium Fuel: Voordelen op zowel economisch als ecologisch vlak?**

**Sebastiaan De Belder**

Masterscriptie voorgedragen tot het bekomen  
van de graad van :

Master in de Toegepaste Economische  
Wetenschappen – Handelsingenieur

Promotor:  
Prof. Dr. Johan Braet



**UNIVERSITEIT ANTWERPEN**

**FACULTEIT TOEGEPASTE ECONOMISCHE WETENSCHAPPEN**

# **Radkowsky Thorium Fuel: Voordelen op zowel economisch als ecologisch vlak?**

**Sebastiaan De Belder**

Masterscriptie voorgedragen tot het bekomen  
van de graad van :

Master in de Toegepaste Economische  
Wetenschappen – Handelsingenieur

Promotor:  
Prof. Dr. Johan Braet

# Abstract

Indien de nucleaire sector energie blijft opwekken met uranium zullen de uranium reserves uitgeput zijn binnen de komende 100 jaar. Uit schrik dat de uranium reserves op het vaste land binnenkort uitgeput zullen zijn, wordt er onderzoek gevoerd om uranium te extraheren uit het zeewater. Er is dus een oplossing nodig om dit verwachte uraniumtekort tegen te gaan. Een oplossing hiervoor is het gebruik van een alternatieve splijtstof. Thorium is een splijtstof dat een mogelijke oplossing kan bieden, waardoor de uranium reserves langer behouden kunnen worden (Serfontein & Mulder, 2013).

Deze thesis onderzoekt of het al dan niet mogelijk is om thorium als brandstof te implementeren in onze huidige kerncentrales. Er wordt een speciale brandstofconfiguratie beschreven waarbij zeer weinig modificaties aan de huidige centrales dienen aangebracht te worden. Die brandstofconfiguratie is de *Radkowsky Thorium Fuel* (RTF), uitgevonden door Alvin Radkowsky tevens oprichter van *Lightbridge Corporation*. In deze thesis wordt er eerst een economische studie gemaakt en daarna wordt onderzocht of het gebruik van deze brandstofconfiguratie ecologisch verantwoord is. Al de bevindingen worden in deze masterproef beschreven.

If the nuclear sector keeps producing energy with uranium, it will not take long until the uranium reserves become exhausted within the next 100 years. Scientists are researching whether it is possible to extract uranium from seawater because the uranium industry fears the exhaustion of the uranium reserves on the mainland. So a solution is needed to counter this expected shortage of uranium. An alternative fertile element can bring this solution, the name of this element is thorium. The use of it in our nuclear plants could expand the uranium reserves for many years (Serfontein & Mulder, 2013).

This thesis researches whether it is possible to use thorium as a fuel in our current nuclear plants. A special fuel configuration for which the nuclear plants do not need many modifications is described. This configuration is called the *Radkowsky Thorium Fuel*, invented by Alvin Radkowsky which is the founder of *Lightbridge Corporation*. This study researches whether it is economical & ecologically valuable to use this fuel. All the results will be mentioned in the master thesis.

# Executive summary

*“About 20 percent of the nation’s electricity is produced in the country’s 65 nuclear power plants. Unlike coal and natural gas, America’s top sources of electricity, nuclear power plants have near-zero carbon emissions. Their carbon footprints make nuclear reactors attractive, but the problems with producing electricity using nuclear technology—specifically, the threat of meltdowns and the disposal of spent, highly radioactive nuclear fuel—are well-known. Public support for the once-burgeoning industry was seriously damaged by the catastrophic events at the Fukushima Daiichi nuclear power plant in Japan last March. In that incident, the plant lost electrical power following a tsunami, and three nuclear reactors experienced full meltdowns. A series of hydrogen explosions ripped through the facility, releasing radioactive material into the air, ground, and sea. The disaster at Fukushima was eventually classified as a level 7 incident—the highest possible level of alert—on the International Nuclear Event Scale. (U.S. News, 2014)”*

By analyzing this article it seems that nowadays the nuclear industry has pros and cons. One of the advantages of nuclear power is the reduction of carbon emissions. On top of that the reserves of coal, gas and oil are shrinking rapidly but also the uranium reserves will be exhausted within 100 years. The industry also has a few disadvantages such as the threat of a meltdown/nuclear disaster and the disposal of highly radioactive nuclear fuel.

Considering the things said above means that we have a problem. The raw materials (oil, gas, coal and uranium) we use nowadays for the generation of energy are shrinking rapidly and they produce a lot of wastes. In fact we are desperately in need for a new form of energy which can fulfill our daily demand of energy. There also exist renewable energies such as solar power, wind power and hydropower but they can’t satisfy our daily demand. We need an alternative!

As an alternative for these problems we have a fertile element in our earth’s crust that could bring the solution. The name of this element is thorium and it is estimated to have reserves that are four times bigger than those of uranium. Starting in the 1950’s some scientists were busy designing all kinds of theoretic nuclear reactors that use thorium. The advantage of these reactors is that they produce nearly no highly radioactive waste nor exists the chance of a meltdown. This makes that the two biggest disadvantages of our nuclear power industry are eliminated! Unfortunately the reactors which use thorium as a fuel are theoretical designs which only have been tested by computer models. Still a lot of research and development needs to be done before they can be commercialized. It will take several years and a lot of investments to get one of these reactors running for commercial purposes.

Another possible solution to our energy problem, is called the *Radkowsky Thorium Fuel* configuration. This fuel can be implemented in our nuclear plants in the near future. This fuel configuration is invented by Alvin Radkowsky an American nuclear scientist who was approached by his former professor to construct a new kind of nuclear fuel. His professor had set up some constraints for developing this fuel:

- *“The RTF concept should be realized as a new fuel design and as such, be completely compatible with existing power plants. Only minor plant hardware modifications, directly related to a different fuel assembly internal arrangement, will be acceptable.*
- *All safety and operational parameters of existing power plants will be preserved.*
- *The fuel design will be based mainly on existing ( not necessarily commercial) fuel technology.*
- *No fuel reprocessing is assumed and the maximum allowable fresh fuel enrichment will be kept below 20% of U-235 content. (Raitses, Galperin, & Todosow, 2012)”*

Alvin Radkowsky managed to design this fuel configuration and patented it right away. Afterwards he founded his own company “Thorium Power Ltd” which later was renamed to “Lightbridge Corporation Ltd”. This company conducted further research and development to commercialize this fuel configuration. Once one of the few front end fuel production companies wants to produce this fuel, they have to get in touch with *Lightbridge Corporation* which can provide them the rights and the details for producing *Radkowsky Thorium Fuel*.

This paper gives the reader a brief view on all the aspects of the *Radkowsky Thorium Fuel* cycle. First it will describe the history of thorium. Why it hasn't been used yet, although it was known in the 1950's that it could be used in nuclear plants to produce energy. Afterwards the thesis will discuss the front end, the reactor and the back end of the RTF cycle. This disquisition gives the reader a decent knowledge about the matter. Besides this informative section there are three key points in the thesis: the economic, the ecologic and the non-proliferation aspect.

In the economic section contains figures which are obtained from four independent parties. These are used in the calculations and afterwards compared to each other. Two of those are figures of the uranium cycle and the other two are those of the *Radkowsky Thorium Fuel* cycle. A normal distribution of the calculated figures was created and it results that the costs of thorium fuel are less than those of uranium. Also the ecologic aspect has its advantages. It is a fact that the fuel configuration invented by Alvin Radkowsky produces less waste than the ordinary uranium fuel which is used nowadays. On top of that contains the used fuel of the *Radkowsky Thorium Fuel* cycle less plutonium than the uranium fuel cycle, which makes RTF less interesting for fabricating nuclear weapons. So the RTF has a much better resistance to proliferation. All these advantages of the RTF-cycle raises only one question: “Why are we not using Radkowsky Thorium Fuel yet?”

An explanation for the question mentioned above is that the matter of the RTF is very unknown to the population. This makes it possible for the industry to keep producing uranium fuel, even though thorium fuel is cheaper. As long as a little number of people and governments are aware of this cost reduction and environmental advantages, they don't need to invest in a new production line which produces *Radkowsky Thorium Fuel* rods.

I would like to thank Gary Sharp (Lightbridge Corporation), Gert Van Den Eynde (SCK), Gerben Croonenborghs (Kabinet Milquet: Nuclear Safety & Security) and Chris De Groof (Universiteit Antwerpen & Electrabel). They have made it possible to get the information needed to conduct this thesis. Last but not least I would like to thank my promoter Johan Braet who has guided me through difficult stages.

Hopefully the results obtained in this work will reach those with enough influence to change our energy policy!

# Inhoudsopgave

Abstract .....	4
Executive summary .....	5
Inhoudsopgave .....	8
Lijst van tabellen, figuren en grafieken .....	11
Tabellen .....	11
Figuren .....	12
Grafieken .....	12
Lijst van gebruikte afkortingen.....	12
Inleiding.....	14
Doelstelling.....	15
Scope .....	16
Methodologie.....	17
Hoofdstuk 1: Thorium .....	19
1.1 Het element Thorium .....	19
1.2 De Geschiedenis .....	20
1.2.1 Thorium en de koude oorlog .....	20
1.2.2 Geschiedenis Dr. Alvin Radkowsky .....	22
Hoofdstuk 2: De nucleaire cyclus van Radkowsky Thorium fuel .....	24
2.1 Ontginning .....	24
2.1.1 Uranium .....	24
2.1.2 Thorium.....	25
2.2 Front end .....	26
2.2.1 Uranium .....	26
2.2.2 Thorium.....	30
2.3 De reactor .....	32
2.3.1 Pressurized Water Reactor .....	32
2.3.2 PWR met Radkowsky Thorium Fuel.....	34
2.4 Back end.....	38
2.4.1 Laag radioactief afval .....	38



2.4.2 Middel radioactief afval .....	38
2.4.3 Hoog radioactief afval .....	38
Hoofdstuk 3: Kosten .....	40
3.1 Kosten uranium dioxide brandstof in België .....	40
3.2 Kosten Radkowsky Thorium Fuel.....	45
3.3 Vergelijking uranium versus thorium: .....	48
Hoofdstuk 4: Weerstand tegen Proliferatie .....	50
4.1 Algemeen.....	50
4.1.1 Eigenschappen splijtbare kernen in nucleaire wapens .....	50
Hoofdstuk 5: Ecologisch aspect.....	53
5.1 Thorium Reserves .....	53
5.2 Ontginning .....	54
5.2.1 Uranium .....	54
5.2.2 Thorium.....	55
5.3 Front end .....	56
5.3.1 Uranium .....	56
5.3.2 Thorium.....	56
5.4 Back end.....	57
5.4.1 Reductie radioactief afval .....	57
5.4.2 Straling van de verbruikte brandstof .....	58
Besluit .....	60
Aanbevelingen .....	62
Bibliografie .....	63
Bijlage: .....	68
Bijlage 1: Borehole mining of In Situ Leaching (ISL) .....	68
Bijlage 2: natte en droge methode.....	70
Bijlage 3: Wervelbedreactor .....	72
Bijlage 4: Gasultracentrifuge .....	73
Bijlage 5: van pellet tot fuel rod assembly .....	74
Bijlage 6: Zeldzame aarden.....	75
Bijlage 7: berekening index, wisselkoers en normaal verdeling .....	83
Bijlage 8: ionenwisselharsen .....	90

Bijlage 9: Verglazing & Ontsmetting kernafval.....	92
Bijlage 10: Gun type & implosion type .....	94
Verklaring op woord van eer.....	96

# Lijst van tabellen, figuren en grafieken

## Tabellen

Tabel 1: Opbouw RTF

Tabel 2: Jaarlijkse brandstofkost België

Tabel 3: Reactors België

Tabel 4: Jaarlijkse kost Doel-4

Tabel 5: Kost gehele brandstof unit wereldprijs

Tabel 6: Gewichtsverlies front end uranium

Tabel 7: Back end kost wereldprijs

Tabel 8: Kost wereldprijs

Tabel 9: Vergelijking tussen België en de wereld

Tabel 10: Front end thorium

Tabel 11: Kost front end thorium

Tabel 12: Back end gewicht thorium

Tabel 13: Kost back end thorium

Tabel 14: Kost thorium

Tabel 15: Kosten Thorium International Atomic Energy Agency

Tabel 16: Kosten uranium vs thorium

Tabel 17: Vergelijking kosten methode 1 versus methode 2

Tabel 18: Proliferatie eigenschappen

Tabel 19: Soorten plutonium in gebruikte splijtstof

Tabel 20: Reserves thorium en uranium

Tabel 21: Thorium reserves

Tabel 22: Radioactiviteit van verschillende materialen

## Figuren

Figuur 1: Configuratie brandstofstaven van RTF voor een PWR

Figuur 2: Grafische voorstelling brandstofconfiguratie RTF

## Grafieken

Grafiek 1: Straling RTF en uranium

# Lijst van gebruikte afkortingen

RTF: Radkowsky Thorium Fuel

PWR: Pressurized Water Reactor

MSR: Molten Salt Reactor

IAEA: International Atomic Agency

NWA: Nuclear World Association

SBU: Standard Blanket Unit

IKS: Instituut voor Kern- en Stralingsfysica

SCK: Studiecentrum voor Kernenergie

Th-(nummer): thorium-(nummer is de atoommassa)

U-(nummer): Uranium-(nummer is de atoommassa)

Pu: Plutonium-(nummer is de atoommassa)

HTGR: High-Temperature Gas-Cooled reactor

LWR: Light Water Reactor

MWth: Megawatt thermische energie

U.S.: United States

$V_m$ : Volume moderator

$V_f$ : Volume brandstof

GWh: Gigawattuur

MWh: Megawattuur

GWe: Gigawatt elektrisch

CREG: De Commissie voor de Regulering van de Elektriciteit en het Gas

MW: Megawatt

SWU: Separative work unit

HM: Heavy metal

NWU: North-West University

TI-208: titanium-208

Bi-212: bismuth-212

Ppm: part per million

mSV: millisievert

# Inleiding

Naar aanleiding van de kernramp in Fukushima werd nogmaals bewezen dat het gebruik van kernenergie een mogelijk gevaar met zich meebrengt voor de beschaving. Dit wil niet zeggen dat het gebruik ervan in een negatief daglicht gezet dient te worden. Nucleaire energie is veel minder vervuilend dan energie opgewekt door middel van gas- of koolcentrales. De uitdaging voor onze generatie bestaat eruit om de nucleaire sector veiliger te maken. Nu rest enkel de vraag: 'Hoe kan dit gerealiseerd worden?'.

Naast het veiliger maken van kerncentrales zal met de loop der jaren de vraag naar energie enkel toenemen wegens de stijgende wereldbevolking. Er zal dus steeds meer en meer energie geproduceerd moeten worden. Deze vraag zal door groene energie en/of kernenergie tegemoet gekomen moeten worden want gas- of koolcentrales zijn te vervuilend en de voorraden zijn beperkt. Daarenboven zijn de uranium reserves tegen een recordtempo aan het slinken. De nucleaire sector snakt naar innovatie.

Het element met atoommassa 232 kan de oplossing bieden voor al deze problemen mits voldoende investeringen. Dit element, thorium, is naar schatting drie tot vier keer meer aanwezig in onze aardkorst dan uranium en het kan geïmplementeerd worden in speciaal ontworpen reactors waarbij de kans op een kernramp zeer klein tot nihil is. Een voorbeeld hiervan is de *Molten Salt Reactor* (MSR). In deze reactor vindt min of meer een gecontroleerde meltdown plaats, indien er zich een probleem voordoet zal de gesmolten oplossing van zout en splijtstof in een onderliggend reactorvat lopen waarin het meteen zal stollen. Dit en tal van andere thoriumreactors zijn theoretisch onderzocht met behulp van computermodellen. Het probleem dat zich echter stelt is dat de wetenschappers over te weinig kapitaal beschikken om de reactoren enkele jaren te laten proefdraaien zodat alle problemen en potentiële gevaren geëlimineerd kunnen worden alvorens commercialisatie.

Als tussentijdse oplossing, ter omschakeling naar een thoriumreactor, heeft Alvin Radkowsky, een Amerikaanse wetenschapper, de *Radkowsky Thorium Fuel* (RTF) uitgevonden. Deze brandstof bestaat deels uit thorium en deels uit uranium. Het grote voordeel ervan is dat de huidige kerncentrales slechts een kleine aanpassing dienen te ondergaan om energie te produceren via deze brandstof. Tevens is er veel minder uranium nodig om dezelfde energieoutput te verkrijgen.

Deze thesis beschrijft het ontstaan van deze brandstof. Nadien wordt de ontginning, de boven- en de benedencyclus van de *Radkowsky Thorium Fuel* toegelicht. Vervolgens komt de economische studie aan bod. Daarna wordt de weerstand tegen proliferatie en het ecologisch aspect onderzocht en besproken. Om dan te eindigen met het besluit waarin al de bevindingen geformuleerd worden.

# Doelstelling

Het belangrijkste aspect van deze thesis, is het informerende karakter. Het bekend maken van *Radkowsky Thorium Fuel* heeft tot gevolg dat er vanuit de maatschappij een verhoogde druk wordt uitgeoefend op de nucleaire industrie, de overheid & de wetenschappelijke wereld om te investeren in onderzoek en ontwikkeling voor het gebruik van thorium.

De grondgedachte van deze thesis bestaat eruit te achterhalen of *Radkowsky Thorium Fuel* werkelijk een geschikte brandstof is ter vervanging van uranium dioxide, rekeninghoudende met zowel de non-proliferatie, het ecologische als economische aspect. De thesis tracht deze onderwerpen te behandelen en in kaart te brengen.

Een andere doelstelling van de thesis is de gehele RTF-cyclus toe te lichten. Het traject vanaf de ontginning tot het opslaan van het nucleair afval wordt besproken. Daardoor krijgt de thesis een meer beschrijvend karakter waarmee de lezer geïnformeerd wordt over het gehele proces. Dit biedt experts de gelegenheid verbeteringen aan te brengen in de ontginning, de front end, de reactor en/of de back end om tenslotte de cyclus te optimaliseren.

Mits het onderzoek op het vlak van economie, ecologie en non-proliferatie een gunstige uitkomst verkrijgt zou deze studie de nucleaire sector kunnen wakker schudden en een aanzet kunnen geven tot de implementatie van dit nieuwe brandstof element. Uiteindelijk is de haalbaarheid van deze doelstelling zeer klein.

## Scope

Deze thesis zal de *Radkowsky Thorium Fuel* en de mogelijke voordelen op zowel economisch, ecologisch als op het vlak van non-proliferatie bespreken. De reden waarom er één specifieke thoriumbrandstof werd verkozen om verder uit te klaren, is omdat deze het dichtst bij z'n potentiële commerciële introductie staat. De rest van de mogelijke toepassingen van thorium zijn hypothetisch en louter getest door computermodellen. Bij andere modellen, waarbij de experimentele fase is aangevat, is alle informatie strikt geheim.

De thesis bespreekt de algemene aspecten van de Radkowsky Thorium brandstofconfiguratie, niet alle technische zaken worden verwerkt omdat over tal van deze zaken een thesis op zich geschreven kan worden. De nadruk van deze thesis ligt op het informerende karakter. Zo zal de *Radkowsky Thorium Fuel* op allerlei vlakken in de mate van het mogelijke worden toegelicht: (1) thorium en zijn geschiedenis, (2) de RTF-cyclus, (3) de kosten, (4) de weerstand tegen proliferatie alsook (5) het ecologisch aspect worden besproken. Waarom in de mate van het mogelijke? Wel, door gebrek aan informatie kan er op een aantal van deze zaken niet in detail getreden worden. Zeer weinig wetenschappelijke literatuur behandelt deze specifieke brandstof, daarenboven kunnen of willen de gecontacteerde personen en instanties in de nucleaire sector weinig tot geen informatie verschaffen. Dit maakt het moeilijk om in detail te treden bij sommige onderdelen.



# Methodologie

In het begin van dit onderzoek was alle aandacht gevestigd op de thoriumreactoren zoals de *Molten Salt Reactor*. Na het doornemen van wetenschappelijke literatuur werd duidelijk dat het een utopisch idee bleek om hierover gedetailleerde info te verkrijgen: alle info beschikbaar over dit soort reactoren was gebaseerd op computermodellen en de info verkregen door proefexperimenten werd niet vrijgegeven. Na het lezen van wetenschappelijke literatuur gepubliceerd door verscheidene onderzoekscentra en universiteiten zoals Brookhaven National Laboratories, Princeton University, International Atomic Energy Agency (IAEA), Nuclear World Association (NWA) en andere kwam de brandstofconfiguratie *Standard Blanket Unit* (SBU) naar voor. Deze brandstof was de gulden middenweg tussen een reactor die uitsluitend op uranium of thorium functioneert. Ooit heeft er in Shippingport een experiment plaatsgevonden met een brandstofmix bestaande uit thorium en uranium de zogenoemde SBU. Echter meer info was hierover niet terug te vinden, tot plots de naam Radkowsky naar voor kwam. Hij heeft een geoptimaliseerde versie van het Shippingport experiment ontwikkeld. Hij heeft ook het bedrijf Lightbridge Corporation opgericht. Dit bedrijf heeft reeds 20 jaar onderzoek gevoerd naar het gebruik van de RTF in commerciële reactoren. Bij deze kon eindelijk het ruime onderwerp thorium beperkt worden tot één bepaalde brandstof. Aangezien over RTF zeer weinig recente wetenschappelijke literatuur geschreven is vormt dit een perfect onderzoeksobject. Daarom luidt de onderzoeksvraag: “Radkowsky Thorium Fuel: voordelen op zowel economisch als ecologisch vlak?” In deze thesis wordt de hele RTF-cyclus behandeld alsook de weerstand tegen proliferatie, de economische en ecologische aspecten komen aanbod.

Voor het literatuuronderzoek werd veel wetenschappelijke literatuur van universiteiten en onderzoekscentra gebruikt. Het probleem dat zich echter stelde was dat er zeer weinig wetenschappelijke literatuur dit specifieke onderwerp behandelt. Daarenboven kwam dan nog eens dat de informatie omtrent de RTF-cyclus verschilde van bron to bron. Enkel de overeenkomsten tussen de verschillende bronnen zijn aangehaald. De technische kant van de RTF-cyclus wordt enerzijds niet in detail behandeld omdat de info hieromtrent niet volledig vrijgegeven wordt. Dit omdat Radkowsky de theoretische brandstofconfiguratie gepatenteerd heeft en Lightbridge Corporation nog bezig is met de laatste testen. Anderzijds kan er over de thermohydraulische en reactor fysische aspecten een thesis op zich geschreven worden, wat niet de bedoeling is van deze thesis. Daarom dus dat de technische kant buiten de scope van dit onderzoek ligt, zoals eerder aangehaald is het een informerende thesis.

Voor het ecologisch onderzoek en de proliferatie is er wetenschappelijke literatuur doorgenomen die gepubliceerd is door Lightbridge Corporation en andere onderzoekscentra. Deze gegevens zijn verkregen via de site van Lightbridge en via de databases van verscheidene universiteiten, internationale agentschappen en researchcentra.

De grootste problemen stelden zich echter bij het vergaren van economische data. De cijfers over thorium zijn per telefoon en mail verkregen via een contactpersoon (Gary Sharp) in Lightbridge Corporation en via papers van North Western University en het International Atomic Energy Agency. De cijfers van de Belgische uraniumcyclus werden niet vrijgegeven noch door Doel noch door Synatom noch door Electrabel zelfs niet als geheimhouding van de cijfers verzekerd werd. Gert van den Eynde (gesprekspartner) een medewerker in SCK en Gerben Croonenborghs (telefonisch contact) medewerker in de beleidscel nucleaire zaken van minister Milquet achten het verkrijgen van de cijfers onmogelijk. Dit omdat de gegevens niet vrijgegeven mogen worden van de staatsveiligheid. Uiteindelijk na overleg met de heer Professor J. Braet, tevens promotor van deze masterproef, stelde hij voor om contact op te nemen met C. De Groof. Deze is directeur van strategie en duurzame ontwikkeling bij Electrabel en wist te vertellen dat de Nationale Bank zou beschikken over een rapport waarin de uranium brandstofkosten van België aangehaald worden. Dit bleek zo te zijn.

Voor deze studie is zeer veel wetenschappelijke literatuur geraadpleegd en er is niet veel menselijke input aan te pas gekomen. Dit omdat de *Radkowsky Thorium Fuel* een zeer onbekende brandstof is in de nucleaire industrie. Zeer veel contactpersonen zoals P. Van Duppen (IKS), D. De Buyst (SCK), P. Schuurmans (SCK) en P. Baeten (SCK) konden niet veel info verschaffen omdat RTF niet tot hun vakgebied behoort. Anderen hebben spijtig genoeg niet gereageerd. Het werd duidelijk dat RTF een 'vergeten' brandstofconfiguratie is die op een zijspoor is gezet door de nucleaire sector. Zo kunnen er bepaalde technische aspecten niet in detail besproken worden, dit door een tekort aan vrijgegeven informatie.

# Hoofdstuk 1: Thorium

## 1.1 Het element Thorium

Het element thorium heeft atoomnummer 90 en staat aangegeven met het symbool Th in de tabel van Mendeljev. De stof behoort tot de actiniden, dit zijn 14 elementen die allen radioactief zijn. De actiniden hebben atoomnummers 90 tot en met 103, ook uranium is lid van deze familie (Environmental Protection Agency, 2014).

Het metaal thorium heeft een zilverwitte kleur, in pure vorm zal het voor maanden blijven schitteren in de lucht, indien het onzuiverheden bevat zal deze schittering niet zo lang duren en verandert het naar een zwarte kleur. Indien men de stof zou opwarmen gloeit het met een witte en heldere schijn. Als men thorium toevoegt aan water, zal de stof traag oplossen, m.a.w. thorium is oplosbaar (Environmental Protection Agency, 2014).

Men vindt de stof over het algemeen terug in kleine hoeveelheden, ze wordt het meest aangetroffen in het mineraal monaziet. Dit mineraal wordt meestal teruggevonden in stollingsgesteenten. Daarnaast wordt thorium in allerlei soorten stenen, bodems, water, planten en zelfs dieren aangetroffen. De stof zit dus overal. Als stenen breken of afslijten door de natuurelementen komt thorium terecht in de bodem, d.m.v. erosie kan ze in rivieren of op stranden terechtkomen en ze kan zelfs in de lucht komen door vulkaanuitbarstingen. Via de lucht en water kan ze dan opgenomen worden door planten of dieren (Thorium, 2011).

Zoals reeds aangehaald behoort thorium tot actiniden. Hierdoor ondergaat ze dus radioactief verval. De thorium-232 straalt een alfadeeltje uit gepaard met gamma straling en vormt om tot radium-228. De halfwaarde tijd van thorium-232 bedraagt echter 14 miljard jaar. Het proces van het verval gaat verder tot uiteindelijk het stabiele element lood-208 is gevormd (Thorium, 2011).

## 1.2 De Geschiedenis

### 1.2.1 Thorium en de koude oorlog

De ontdekking van thorium dateert van 1828, toen ontdekte Jöns Jacob Berzelius de stof, hij was een Zweeds chemicus en hij noemde zijn ontdekking naar de Noorse god van de donder, Thor. In 1898 ontdekte Marie Curie dat thorium radioactief is (Environmental Protection Agency, 2014); (Schaffer, 2013).

Meer dan 60 jaar geleden begon het onderzoek naar thorium als nucleaire brandstof. Deze interesse ging immers gepaard met het begin van nucleaire energiesector die gebaseerd was op uranium. Eerst leek thorium een veel belovend element want het was in grotere mate dan uranium aanwezig in onze aardkorst. De interesse voor thorium begon te minderen wanneer men ontdekte dat het zeer moeilijk was om uranium-233 (residu van thorium) te gebruiken voor wapens. Dit was niet het geval voor de U-235 en Pu-239, stoffen afkomstig van uraniumsplijting. Het was in die tijd zeer belangrijk voor zowel de Verenigde Staten van Amerika als de Sovjet Unie om zo snel mogelijk, zoveel mogelijk (kern)wapens te produceren. Thorium kwam hier niet voor in aanmerking en moest wijken voor uranium. Door de wapenwedloop in de Koude Oorlog werd thorium genegeerd. De rest van de wereld volgde het voorbeeld van deze twee leidinggevende naties, ze startten allen eigen kerncentrales die uranium als brandstof gebruiken (Martin, 2012).

Toch zagen enkele wetenschappers de voordelen van thorium in en hebben ze onderzoek gevoerd naar het gebruik van dit element in reactors. Over de jaren heen hebben ze enkele reactors geconstrueerd, allen zijn tijdelijk opgericht geweest met als hoofddoel onderzoek te voeren. Deze reactors functioneerden op verscheidene manieren. Zo zijn er in de loop der jaren *High-Temperature Gas-Cooled reactors* (HTGR), *Light Water Reactors* (LWR), *Molten Salt Reactors* en *Pressurized Heavy Water Reactors* (PHWR) geconstrueerd. Er is nooit in één van al deze ontwikkelingen veel geïnvesteerd om de reactors als commerciële unit te gebruiken (met uitzondering van het Shippingport experiment), dit in tegenstelling met de uraniumcyclus die vrijwel geoptimaliseerd is (Martin, 2012).

Zoals reeds aangehaald werd het onderzoek naar thorium tijdens de Koude Oorlog bijna volledig gestaakt. Er hebben nog enkele experimenten plaatsgevonden. Zo liep er in de jaren 40 een project om op alternatieve wijze vliegtuigmotoren aan te drijven, dit onderzoek vond plaats in het Oak Ridge National Laboratory dat gevestigd is in Tennessee. De jaren daarop was het zeer stil, maar in de jaren 60 bouwden wetenschappers een testreactor die 4 jaar heeft gefunctioneerd (1965 tot 1969). Deze reactor was een *Molten Salt reactor*. Ze genereerde 8MWth met andere woorden werd 8 megawatt thermische energie geproduceerd (Martin, 2012).

In 1977 werd in de kerncentrale van Shippingport (U.S.) een vijfjarig experiment voor commerciële doeleinden uitgevoerd waarbij men gebruik maakte van een thorium-uranium brandstof. Dit experiment was baanbrekend voor de nucleaire energie-industrie, er werd hier immers aangetoond dat er op een veilige manier energie kon opgewekt worden door middel van een mix van thorium en uranium. Ondanks de positieve uitkomst werd het gebruik van thorium genegeerd door de nucleaire industrie. Tot op heden is dit nog altijd de enigste commerciële reactor die over een lange tijd, vijf jaar, energie heeft opgewekt met behulp van thorium (Martin, 2012).

In het jaar 1991 kwam er een lichtpuntje in de donkere geschiedenis van thorium energie, een zekere Dr. Radkowsky ontwikkelde een geoptimaliseerde versie van het Shippingport experiment. Hij ontwikkelde een ontwerp voor een reactorkern dat bestond uit een 'seed' (verrijkte uraniumstaven) en een 'blanket' (thoriumstaven). De *seed* regio zou immers in het midden van de assembly gepositioneerd zijn en de *blanket* zou de *seed* regio omringen. Radkowsky patenteerde het ontwerp van deze nucleaire brandstof en richtte in 1992 een bedrijf op, namelijk 'Thorium Power Ltd'. Om de brandstof te commercialiseren moest echter nog zeer veel onderzoek gevoerd worden naar de perfecte samenstelling van de brandstofstaven (Martin, 2012).

In het jaar 2000 vestigde een ingenieur aan Nasa's Marschall Space Flight Center, Kirk Sorensen, zijn aandacht op thorium en zijn toepassingen. Hij was immers op zoek naar een manier om ruimteschepen en kolonies op de maan te voorzien van energie. Hij richtte een eigen bedrijf genaamd *Flibe Energy* op met als doelstelling een commerciële *Molten Salt Reactor* te ontwikkelen. Vanaf dit moment is de belangstelling voor thorium drastisch toegenomen mede door de vermeende opwarming van de aarde en de kritischere tijdsgeest. Tegenwoordig heeft thorium al een grote hoop aanhangers, maar het grote publiek moet nog altijd bereikt worden (Holly, 2013).

### 1.2.2 Geschiedenis Dr. Alvin Radkowsky

Het ontstaan van de *Radkowsky Thorium Fuel* is te danken aan de nucleair ingenieur Dr. Alvin Radkowsky. Hij vond de *Radkowsky Thorium Fuel* uit, dit is een nucleaire brandstof die in mindere maten nucleair afval genereert en het afval dat geproduceerd wordt is verre van optimaal om gebruikt te worden in nucleaire wapens (Chang, 2002).

Dr. Radkowsky is geboren op 30 juni 1915 in New Jersey. In the City College of New York heeft hij voor elektrisch ingenieur gestudeerd, daarna heeft hij zijn studies voortgezet met een studie fysica in George Washington University. Hij was burgerlijk ingenieur in de kernfysica en werkte van 1938 tot 1972 voor de U.S. Navy (News, 2002).

Dr. Radkowsky stond aan het hoofd van het departement ter ontwikkeling van nucleaire reactors geschikt om marineschepen en duikboten aan te drijven. In 1954 verwezenlijkte Radkowsky de doelstelling van het U.S. Naval Reactors Program, hij produceerde de eerste nucleaire duikboot genaamd 'Nautilus'. Vanaf toen was hij één van de top wetenschappers in het ontwikkelen van reactors wereldwijd. Hierna spitste hij zich toe op het ontwikkelen van een nucleaire reactor voor commerciële doeleinden. Deze goal behaalde hij ook in late jaren vijftig in Shippingport, Pennsylvania. In 1957 werd de reactor voor het eerst in gebruik genomen, dit was de eerste reactor op grote schaal die niet werd gebruikt door het leger (Chang, 2002); (Martin, 2012); (Negev, 2005).

In 1972 verliet Radkowsky de U.S. Navy en emigreerde hij naar Israel. Daar ging hij doceren aan de universiteit van Tel Aviv. Een tiental jaar later werd Dr. Radkowsky gecontacteerd door zijn oud professor Teller. Deze vroeg hem om een nieuw ontwerp van nucleaire fuel te ontwikkelen dat gebruik maakt van thorium met als bijkomende restrictie dat het minder nucleair afval genereert dan de conventionele kerncentrales. Tevens moest het afval verre van bruikbaar zijn voor nucleaire wapens. Na 8 jaar intensief onderzoek verwezenlijkte Dr. Radkowsky deze doelstelling. Meteen patenteerde hij z'n ontwerp en startte hij een eigen bedrijf op, namelijk Thorium Power Ltd (Chang, 2002); (Martin, 2012).

#### *Het Idee*

De hoofdgedachte bij het ontwikkelen van de RTF is dat de berg nucleair afval zou verkleinen, de ontginning van het schaarse natuurlijk uranium zou doen inkrimpen en het gebruik van nucleair afval in wapens zou doen afnemen. Een bijkomende vereiste is dat de brandstof zich zo competitief mogelijk moet profileren op de markt. Dit alles verenigde Dr. Radkowsky in de *Seed and Blanket Unit* (Raitses, Galperin, & Todosow, 2012).

### *Thorium Power Ltd*

Het bedrijf werd opgericht in 1992 met z'n hoofdzetel gevestigd in Washington, D.C. Buiten Dr. Radkowsky werkten nog enkele andere sleutelfiguren in het bedrijf. Eén van de hoofdpersonen in het bedrijf is de gekende Hans Blix, deze was bij het International Atomic Energy Agency voormalig Directeur Generaal, ook was hij het hoofd van de United Nations wapeninspectie in Irak. Door zijn tegenwind tegen de Bush administratie in verband met de massavernietigingswapens is hij de bekendste medewerker in Thorium Power Ltd. Thomas Graham die als hoofd van wapencontrole onder president Clinton heeft gediend is ook actief in het bedrijf (Martin, 2012).

De timing van de opstart was perfect, juist na de val van de muur en dus het einde van de Sovjet Unie. De nucleaire wetenschappers en technici werden allen op straat gezet aangezien de wapenwedloop tot een einde kwam. Deze zochten werk en Thorium Power had dus een overaanbod aan goedgeschoolde werkkrachten (Martin, 2012).

In 1994 is het bedrijf verhuisd naar Rusland, daar is het een samenwerking gestart met het 'Kurchatov Institute' dit is een onderzoekscentrum. Het bedrijf kreeg vele subsidies in de jaren negentig van de Amerikaanse overheid. Doorheen de jaren is er dan ook zeer veel onderzoek gevoerd naar het optimaliseren van de Radkowsky Thorium brandstof (Corporation, 2014).

In 2002 vond de beursintroductie van Thorium Power Ltd plaats. Het bedrijf leed een enorm verlies in 2005 bij de dood van de oprichter, de bezieler van de *Radkowsky Thorium Fuel* zal nooit een gecommmercialiseerde reactor meemaken. Twee jaar later sloot Thorium Power een strategische alliantie met het Russische Red Star (Krasnaya Zvezda) met het oog op testen te volbrengen voor de commercialisering van thorium fuel. Dit Russische bedrijf is een staatsbedrijf dat zich bezig houdt met nucleaire ontwerpen. In 2009 veranderde het bedrijf van naam, Thorium Power Ltd werd omgedoopt naar Lightbridge Corporation (Martin, 2012).

# Hoofdstuk 2: De nucleaire cyclus van Radkowsky Thorium fuel

Om deze brandstof te introduceren in onze hedendaagse maatschappij dient het gehele plaatje gekend te zijn. Zo kan er ook een gefundeerde economische en ecologische studie gemaakt worden. In de nucleaire cyclus van *Radkowsky Thorium Fuel* zijn er enkele bijkomstigheden in vergelijking met de door België gebruikte Uranium dioxide cyclus. Deze zijn terug te vinden bij zowel de ontginning, de front end, de reactor als bij de back end van de cyclus. Zo moet er naast de 'normale' ontginning, conversie, verrijking en fabricatie van uranium ook thorium ontgonnen en gefabriceerd worden. De twee stoffen zullen dan volgens een vooropgestelde configuratie samen plaatsnemen in de reactor. Bij de back end zijn de verschillen vooral op te merken in de samenstelling en de hoeveelheid van het afval. Hieronder zal elke activiteit kort belicht worden. Een uitgebreide uiteenzetting over al deze activiteiten valt echter buiten de scope van dit onderzoek.

## 2.1 Ontginning

### 2.1.1 Uranium

De ontginning van uranium bestaat uit twee verschillende activiteiten namelijk het opzoeken van gronden rijk aan uranium en het extraheren van het uraniumerts uit de grond.

#### *Het opzoeken van grond rijk aan uranium*

Natuurlijk uranium is een metaal met grijsachtige kleur dat bestaat uit 2 isotopen namelijk uit het niet splijtbare Uranium-238 en uit het splijtbare Uranium-235. Isotopen zijn atomen die hetzelfde aantal protonen hebben maar een verschillend aantal neutronen. Dus bovenstaande stoffen beschikken elk over 92 protonen maar U-235 bevat 143 neutronen en U-238 heeft er 146 (Areva, Prospection: Identifying new uranium deposits - Areva, 2013).

Over het algemeen wordt er 3 gram uranium per ton aangetroffen in de aardkorst. De mijngroeves bevatten gemiddeld zo'n 100 gram tot 10 kilogram uraniumerts per ton. Voor het ontdekken van gronden rijk aan dit erts heeft men verschillende methodes (Areva, Prospection: Identifying new uranium deposits - Areva, 2013):

- Geologische studies van de regio
- Metingen van radioactiviteit in de grond
- Het bestuderen van de grond en het water door middel van chemie
- Het interpreteren van lucht- of satellietfoto's
- Geofysische technieken, waarbij radioactiviteit van de grond gemeten wordt uit de lucht (Areva, Prospection: Identifying new uranium deposits - Areva, 2013)



Eens men een grond heeft gevonden die rijk is aan uranium dient er een studie gemaakt te worden om te zien of het oprichten van een mijn valabel is. Dit hangt af van een paar factoren. De hamvraag is immers of de exploitatie van de site winstgevend zal zijn. Ten tweede zal er ook rekening gehouden moeten worden met de impact op de omgeving en de lokale gemeenschappen. Indien beide factoren een gunstige uitkomst hebben kan men beginnen met het opstarten van een mijn (Areva, Prospection: Identifying new uranium deposits - Areva, 2013).

### *Het extraheren van het uraniumerts*

Na alle technische en economische haalbaarheidsstudies kan men van start gaan met de ontginning. Er zijn drie manieren waarop men het uraniumerts ontgint, namelijk *open-pit mining*, ondergrondse mijnen en *borehole mining* (bijlage 1). Bij *open-pit mining* graaft men tot op een maximum diepte van 150 meter, bij ondergrondse mijnen ligt het erts diep en zal men tunnels graven om het erts te bereiken. *Borehole mining* wordt vooral gebruikt in zandachtige gronden. Hierbij wordt een chemische oplossing in de grond gepompt, deze zal het uranium oplossen en vervolgens wordt de oplossing terug opgepompt. Het ontginnen van dit erts is niet zonder gevaar, de gezondheid van de mijnwerkers kan geschaad worden bij het inademen van radongas. Dit gas kan vrijkomen door het uiteenvallen van uranium. Ter bescherming van de mijnwerkers zijn de mijnen voorzien van spray installaties om het stof tegen te gaan en ze worden constant hevig geventileerd (Areva, Operation: extracting uranium ore, 2013).

### **2.1.2 Thorium**

De ontginning van thorium bestaat uit twee activiteiten, ten eerste gaat men thorium winnen en vervolgens zal men dit gaan concentreren. Opmerking: alle percentages die voorkomen in deze thesis hebben betrekking tot de massa, indien anders wordt dit vermeld.

### *Het Winnen en concentreren van monaziet*

Thorium wordt vooral teruggevonden in het mineraal monaziet. Monaziet is een fosfaat ( $\text{PO}_4$ ) dat meestal vergezeld wordt door één van of door meerdere van volgende elementen: cerium, lanthanum, yttrium of thorium. Doordat thorium aanwezig is in dit element kan het zijn dat er ook uranium en dus ook lood in monaziet bevat zit. Meestal bevat het mineraal van z'n totale gewicht zes à zeven procent thorium. De meeste thoriummijnen bevinden zich in India aan de Malabar kust. Door middel van de golfwerking wordt het mineraal op de stranden als geelbruin zand afgezet (Britannica, 2014).

Bij het dreggen van de stranden worden ook andere mineralen opgenomen, de lichtere mineralen worden via het gebruik van schudtafels eruit gewassen (denk aan goudzoekers) en de anderen worden door elektromagnetische separatoren afgescheiden. Dit gebeurt op basis van een verschillende magnetische permeabiliteit, dus op basis van hoe goed het mineraal een magnetisch veld geleidt (Britannica, 2014).

## 2.2 Front end

### 2.2.1 Uranium

De front end activiteiten van uranium bestaan uit het zuiveren van het erts, de conversie en het verrijken van het uranium. Tevens behoort ook de productie van brandstofstaven tot één van de front end activiteiten.

#### *Het zuiveren van het erts*

Eenmaal het erts geëxtraheerd is, zal het in de processingplant bewerkt worden. Het ruwe erts zal afhankelijk van de uranium inhoud verwerkt worden door *Dynamic Treatment* of door *Acid Heap Leaching*. De eerstgenoemde wordt gebruikt voor erts met een grote hoeveelheid uranium, dit wil zeggen 0,10 procent of meer van het totale gewicht en *Acid Heap Leaching* gebruikt men voor alle ertsen onder de 0,10 procent. Tijdens beide processen zal het erts tot fijne korrels gemalen worden, vervolgens wordt het gezuiverd door chemische oplossingen en uiteindelijk wordt de stof gedroogd. Dan wordt er een vast uraniumconcentraat verkregen dat ongeveer 75 procent uranium. Dit wordt ook wel "The Yellow Cake" genoemd. Deze *yellow cake* ( $U_3O_8$ ) of triuranium octoxide verpakt men in vaten en verstuurt men naar conversie fabrieken voor verdere verwerking (Areva, Uranium processing, 2013).

#### *Conversie van natuurlijk uranium*

In de conversie fabrieken aangekomen zal de yellow cake door middel van twee chemische ingrepen omgevormd worden tot uranium hexafluoride ( $UF_6$ ). In de eerste fase bekomt men uranium tetrafluoride ( $UF_4$ ) en in de tweede komt men tot het eindproduct. Het bekomen van dit uranium hexafluoride is een vereiste om het uranium te kunnen verrijken. Dit gaat als volgt: eerst wil men uranium dioxide ( $UO_2$ ) verkrijgen. Dit kan enerzijds door de droge methode of anderzijds door de natte methode (bijlage 2), beiden worden hieronder kort besproken. (Areva, Conversion, 2013).

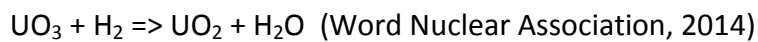
#### *Droge methode*

Hierbij warmt men het triuranium octoxide sterk op, om de onzuiverheden eruit te krijgen. Nadien wordt de stof fijn gemalen. Het fijne en gezuiverde  $U_3O_8$  wordt dan in een oven gestoken vergezeld van waterstof, als eindproduct wordt er uranium dioxide verkregen (Areva, Conversion, 2013).



### Natte methode

In de natte methode wordt het  $U_3O_8$  opgelost in salpeterzuur. Aan deze oplossing wordt nog eens een oplossing van tributylfosfaat ( $C_{12}H_{27}O_4P$ ) met kerosine of met dodecaan ( $C_{12}H_{26}$ ) toegevoegd. Het uranium wordt opgenomen door het organische extractiemiddel. Dit maakt dat het uranium uit de oplossing kan worden uitgewassen door verdund salpeterzuur ( $HNO_3$ ) en vervolgens kan het geconcentreerd worden door verdamping. Daarna wordt de stof verwarmd in een wervelbedreactor (bijlage 3) om uranium trioxide ( $UO_3$ ) te verkrijgen. Uiteindelijk wordt er waterstof toegevoegd aan het  $UO_3$  en door verhitting wordt er uranium dioxide verkregen (Areva, Conversion, 2013).

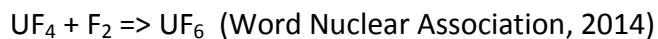


### Vorming uranium hexafluoride

Het uranium dioxide wordt verwarmd in een oven samen met gasvormig waterstoffluoride (HF) en dit geeft als eindproduct uranium tetrafluoride ( $UF_4$ ).



Dit tetrafluoride wordt dan samen met gasvormig fluor in een wervelbedreactor gevoegd, hier wordt dan uranium hexafluoride ( $UF_6$ ) gevormd.



Dit uranium hexafluoride wordt afgekoeld zodat het terug vloeibaar wordt. Eens vloeibaar kan het getransporteerd worden. Zo wordt het in grote stalen cilinders getransporteerd. Deze zijn hier speciaal voor ontworpen en wegen zo'n 15 ton als ze gevuld zijn. Nu kan het vervoerd worden naar de verrijkingsinstallatie (Areva, Conversion, 2013).

### *Verrijking van uranium*

Natuurlijk uranium is opgebouwd uit twee isotopen namelijk het onspijtbare U-238 en het spijtbare U-235. De laatst genoemde is het uranium dat de reactors gebruiken. De hoeveelheid U-235 (0,7 procent) is te laag want het merendeel van de nucleaire reactors gebruikt uranium dat verrijkt is tot een drie à vijf procent U-235. Het uranium dat gebruikt wordt in de RTF is verrijkt tot 12,2% of 20%. Uranium wordt meestal verrijkt door het gebruik van gasultracentrifuges (bijlage 4) (Areva, Enrichment, 2013).

Dit gaat als volgt, het uranium hexafluoride verkregen in de conversie van natuurlijk uranium wordt in gasvormige toestand in een cilinder geplaatst, elke cilinder bevat een rotor van drie tot vijf meter lang met een diameter van 20 centimeter. Als de rotor snel begint te draaien ( 50.000 tot 70.000 toeren per minuut) zullen de lichtelijk zwaardere moleculen (U-238) zich begeven naar de buitenkant van de cilinder en dus neemt hun concentratie hier toe. Het tegenovergestelde geldt voor U-235, hiervan zal de concentratie toenemen in het midden van de cilinder. Dit wordt ettelijke malen overgedaan totdat het gewenste percentage U-235 bereikt wordt. Het gewenste percentage verrijkt uranium aanwezig in de *seed* straven bedraagt 20%, voor de staven in de *blanket* wordt er geopteerd voor uranium dat tot 12,2% verrijkt is (Areva, Enrichment, 2013).

### *Productie brandstofstaven*

Het produceren van brandstofstaven bestaat uit drie belangrijke activiteiten. Eerst zal het inkomende verrijkte uranium hexafluoride ( $UF_6$ ) verwerkt worden tot uranium dioxide ( $UO_2$ ), vervolgens zullen hieruit de uranium dioxide pellets worden vervaardigd. De laatste stap in de productie van brandstofstaven houdt in dat de speciaal geproduceerde staven opgevuld worden met de brandstofpellets en de staven zullen gerangschikt worden in een speciale structuur (World Nuclear Association, 2014).

De productie van uranium dioxide kan geschieden op twee manieren. Bij de droge methode wordt het uranium hexafluoride verwarmd tot gas. Dit gas wordt gemengd met stoom en er wordt uranyl fluoride ( $UO_2F_2$ ) verkregen. Het verkregen poeder wordt dan samengevoegd met waterstofgas ( $H_2$ ) (verdund in stoom) zodat het fluoride bindt met  $H_2$  zodanig dat er enkel nog microkristallijn  $UO_2$  (poedervorm) overblijft. De natte methode is een minder gebruikte manier en hierbij wordt ook meer afval geproduceerd. Deze methode wordt niet besproken (World Nuclear Association, 2014).

Het fabriceren van de keramische uranium dioxide pellets begint bij het pletten van het poeder in matrijzen tot cilinderachtige groene korrels. De korrels worden dan gesinterd (= zodanig verhitten tot een temperatuur waarop ze net niet smelten) op een temperatuur van  $1750^{\circ}C$ . Het voordeel van sinteren bestaat eruit dat er een zeer hard materiaal ontstaat en het volume van de korrels wordt gereduceerd. Vervolgens ondergaan de pellets een strenge controle inzake hun afmetingen en de kwaliteit. Een pellet heeft bijna een diameter van één centimeter en is net iets langer dan één centimeter (World Nuclear Association, 2014).

Deze pellets worden dan in buizen geladen die gemaakt zijn van een zirkoniumlegering. Deze staven hebben een vaste kern van pellets, die dan op hun beurt omgeven worden door de zirkoniumlegering. Vervolgens wordt deze buis, ook wel brandstofstaaf genoemd, onderdruk gebracht met helium en dichtgelast. Er is een vrije ruimte tussen de bovenkant van de pellets en het dichtgelaste deksel. Deze ruimte wordt het plenum genoemd en ze komt van pas voor thermische uitzetting van de pellets en voor het vrijkomen van enkele gassen bij de splijting. Soms wordt er een veer in het plenum gebruikt om zo de pellets op hun plaats te houden of te drukken. De gevulde brandstofstaven worden vervolgens gerangschikt in een rooster, eens dit rooster gevuld is kan er gesproken worden van een 'fuel rod assembly'. Een reactor bestaat uit enkele tientallen assemblies, de hoeveelheid hangt echter af van het type reactor (World Nuclear Association, 2014).

### 2.2.2 Thorium

Bij thorium behoren er drie activiteiten tot de front end. Eerst zal men het monaziet raffineren om het klaar te stomen voor de finale zuivering. Eens Thorium dioxide ( $\text{ThO}_2$ ) bekomen is zal er overgegaan worden tot de laatste activiteit van de front end van thorium, met name de productie van de brandstofstaven. (Britannica, 2014)

#### *Raffineren*

Monaziet is zeer gevoelig voor zuren en basen. Hierdoor kan men op twee manieren het thorium bewerken om het bruikbaar te maken voor de finale zuivering.

#### *Zuurbehandeling*

Ten eerste kan dit door de zuurbehandeling. Bij een temperatuur van 155 tot 230°C wordt het fijngemalen monaziet gemengd met geconcentreerd (93 procent) zwavelzuur ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Dit maakt dat het fosfaat en het metaal vervat in het monaziet zullen oplossen. Bij deze oplossing wordt dan een waterige ammoniakoplossing toegevoegd, hierdoor zal het gehydrateerde thoriumfosfaat neerslaan en door metathese verkrijgt men thoriumhydroxide. Metathese is een chemisch proces waarbij chemische bindingen worden uitgewisseld tussen reagerende stoffen. Dit thorium wordt vervolgens opgelost in salpeterzuur om een thorium nitraathoudende oplossing te verkrijgen, deze zal bruikbaar zijn voor de finale zuivering (Britannica, 2014).

#### *Basebehandeling*

Bij de basenbehandeling wordt het fijngemalen monaziet gemengd met een geconcentreerde natriumhydroxide oplossing (NaOH). Dit bij een temperatuur van 138°C. Men zal een vast hydroxide product verkrijgen. Verschillende minerale zuren worden dan gebruikt om deze vaste stof op te lossen. Een voorbeeld hiervan is de behandeling met zoutzuur, dit geeft een oplossing van thorium en een aantal zeldzame aarde chloriden. Zeldzame aarden zijn zeventien zware scheikundige elementen die op aarde aanwezig zijn. Enkele voorbeelden: scandium, yttrium en de vijftien lanthaniden (bijlage 6). Thorium wordt dan gedeeltelijk gescheiden van deze zware aarden door het gebruik van NaOH. De ruwe thoriumhydroxide neerslag wordt dan, zoals bij de zuurbehandeling, opgelost in salpeterzuur voor de finale zuivering (Britannica, 2014).

## *Finale zuivering*

Er wordt gebruik gemaakt van tributylfosfaat om het thorium te zuiveren van de overblijvende zeldzame aarden en andere onzuiverheden dat het thorium nog kan bevatten. Beide stoffen worden in contact gebracht door een geschikt koolwaterstof (niet gedefinieerd welk). Dit organisch element wordt nogmaals in contact gebracht met een kleine hoeveelheid salpeterzuur om de overblijvende zeldzame aarden en andere onzuiverheden te verwijderen. Uiteindelijk zal dan ook het tributylfosfaat door gebruik van een waterige salpeterzuuroplossing verwijderd worden van het thorium. Dan blijft er enkel nog de nitraatoplossing met het thorium over, dit nitraat kan weggebrand worden zodanig dat enkel thorium dioxide ( $\text{ThO}_2$ ) overblijft (Britannica, 2014).

## *Productie brandstofstaven:*

Voor het produceren van brandstofstaven wordt er gebruik gemaakt van de *powder-pellet route*. Hierbij maakt men gebruik van  $\text{ThO}_2$  en  $\text{UO}_2$  in poedervorm. Beide stoffen worden in gewenste hoeveelheden gemengd met elkaar. Voor een *blanket* brandstofstaaf  $(\text{Th}+\text{U})\text{O}_2$  waarvan 13% van het volume wordt ingenomen door uranium (International Atomic Energy Agency, 2005); (Raitses, Galperin, & Todosow, 2012).

Vervolgens wordt dit gemengde poeder geplet in matrijzen. Hierdoor ontstaan er pellets. Deze kleine pellets voldoen nog niet aan de vereiste dichtheid daarom worden ze gesinterd. Dit proces vindt plaats bij temperaturen van  $2000^\circ\text{C}$  of meer. Deze hoge temperaturen zijn vereist omdat  $\text{ThO}_2$  een zeer hoog smeltpunt heeft. Onlangs is er ontdekt dat  $\text{U}_3\text{O}_8$  een hulp kan bieden bij het sinteren van  $(\text{Th},\text{U})\text{O}_2$  pellets. Door toevoeging van 2% van bovengenoemde stof kunnen de pellets een nog hogere dichtheid verkrijgen en de temperatuur van het sinteren kan teruggebracht worden tot  $1100^\circ\text{C}$  (International Atomic Energy Agency, 2005).

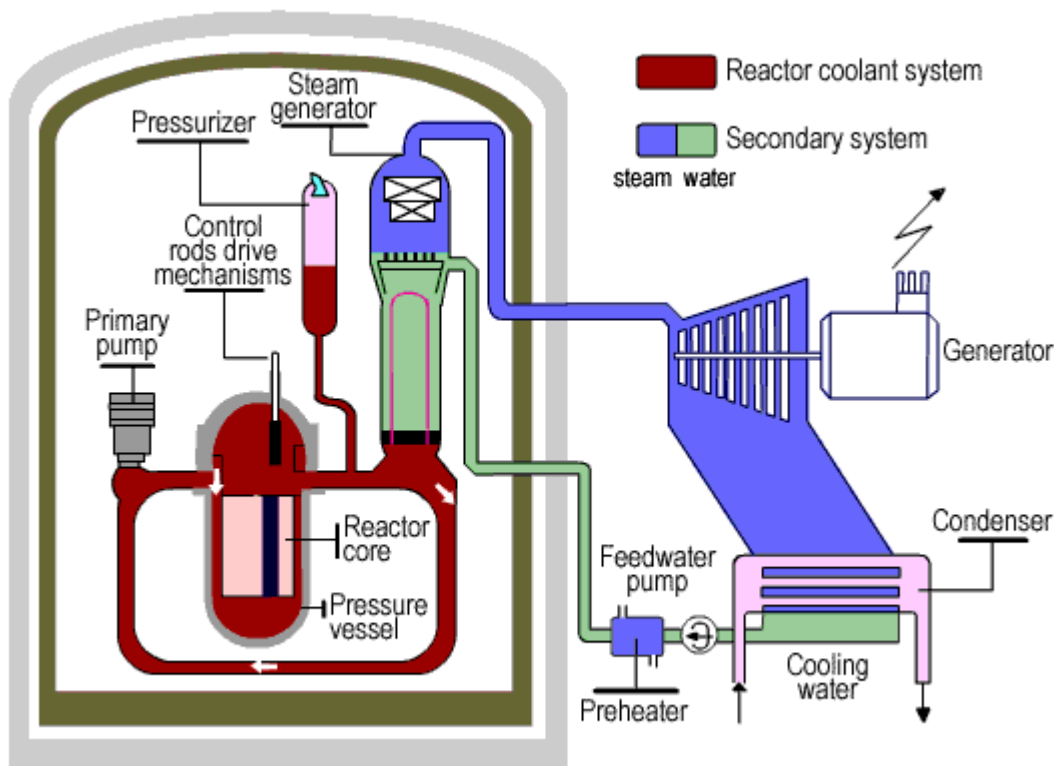
Deze pellets worden dan in buizen geladen die gemaakt zijn van een zirkoniumlegering. Vervolgens wordt deze buis, ook wel brandstofstaaf genoemd, onderdruk gebracht met helium en dichtgelast. Er is een vrije ruimte tussen de bovenkant van de pellets en het dichtgelaste deksel. Deze ruimte wordt het plenum genoemd en ze komt van pas voor thermische uitzetting van de pellets en voor het vrijkomen van enkele gassen bij de splijting. Soms wordt er een veer in het plenum gebruikt om zo de pellets op hun plaats te houden of te drukken. De gevulde brandstofstaven worden vervolgens gerangschikt in een rooster, eens dit rooster gevuld is kan er gesproken worden van een *fuel rod assembly*. Een reactor bestaat uit enkele tientallen assemblies, de hoeveelheid hangt echter af van het type reactor (International Atomic Energy Agency, 2005).

## 2.3 De reactor

### 2.3.1 Pressurized Water Reactor

De huidige commerciële reactoren in België zijn allen *Pressurized Water Reactors* in het Nederlands worden ze ook hogedrukreactor genoemd.

De reactorkern bevindt zich in het eerste circuit (rood op tekening). Deze cyclus, volledig afgesloten van de buitenwereld, is gevuld met water en staat onder hoge druk. Door de nucleaire splijting in de reactorkern komt er veel hitte vrij, deze verwarmt het water in het eerste circuit. Dit water verwarmt dan op zijn beurt het water dat zich in het tweede circuit bevindt. Dit circuit is ook volledig afgesloten van de buitenwereld om uit te sluiten dat er bestraald water in de natuur vrijkomt. De overdracht van warmte vindt plaats door middel van zeer veel kleine buisjes van circuit 1 te laten lopen door het water van circuit 2. Dit brengt met zich mee dat er stoom wordt gevormd in circuit 2, deze stoom zal de turbine in werking stellen die op zijn beurt de generator laat draaien. De stoom komt dan in een condensor terecht. De condensor gebruikt water vanuit de omgeving. Daarom dat kerncentrales dan ook uitsluitend naast waterlopen worden gebouwd (Bel V, 2008).



(Areva/EDF)



De reactortemperatuur kan oplopen tot een 320°C en de druk in het eerste circuit moet tussen de 150 a 160 bar bedragen zodat het water niet kookt. Het water in het eerste circuit heeft twee functies. Ten eerste wordt het gebruikt als koelmiddel: het komt onderaan in de reactorkern binnen tegen een temperatuur van 270°C en 'koelt' de reactor door middel van warmteoverdracht. De tweede functie van het water in het eerste circuit bestaat eruit dat het fungeert als moderator van de reactie. In deze hogedrukreactor is het nodig dat de neutronen die vrijkomen na splijting worden vertraagd om de kettingreactie in stand te houden. Dit proces wordt ook wel *moderation of thermalization* genoemd. De waterstofatomen botsen veel met de neutronen waardoor de neutronen vertragen. Door dit proces bezit het water in de reactor een belangrijke veiligheidstoepassing. Als de temperatuur oploopt, zal de vloeistof uitzetten waardoor de atomen verder uit elkaar liggen en er minder botsingen tussen neutronen en waterstof kan plaatsvinden. Dit heeft als gevolg dat de neutronen niet meer of minder gemodereerd/vertraagd kunnen worden en de reactie in de reactor zal verminderen. Dit principe steunt op de optimale absorptiesnelheid van uranium. De kans is klein dat U-235 snelle neutronen absorbeert daarentegen neemt het wel gemakkelijk trage neutronen op. Dit soort reactor is het meest gebruikte type. Er zijn meer dan 230 *Pressurized Water Reactors* operationeel in de wereld en dan zijn er nog enkele honderden actief in de scheepvaart. Vooral duikboten en vliegdekschepen maken hier gebruik van (Bel V, 2008).

Het succes van de PWR ligt erin dat het veel voordelen biedt. Een belangrijk aspect voor een kerncentrale is het onderhoud van de reactor. Hierin munt de PWR uit omdat hij uit verschillende circuits bestaat. De reactor kan soms, niet altijd, een onderhoudsbeurt krijgen in het tweede of derde circuit zonder dat de reactor stilgelegd dient te worden. Dit is een enorm voordeel aangezien de *shutdown* en *start-up* fase lang duren. Indien onderhoud vereist is aan circuit 1 of er dient een nieuwe batch brandstof geplaatst te worden in de reactor, dan dient hij uiteraard stilgelegd te worden (Bel V, 2008).

Een ander voordeel van deze reactor is de stabiliteit, indien de temperatuur stijgt wordt er minder energie geproduceerd. De reactor beschikt ook over zeer veel veiligheidssystemen. Het belangrijkste zijn de controlestaaf assemblies. Zij controleren de reactor en zijn vervaardigd uit cadmium, zilver en indium, dit zijn materialen die neutronen absorberen. Ze worden door elektromagneten vastgehouden, indien zich een stroomuitval voordoet lossen de magneten onmiddellijk de staven. Deze vallen in het reactievat en nemen alle neutronen op waardoor de reactie tot stilstand komt (Bel V, 2008).

### 2.3.2 PWR met Radkowsky Thorium Fuel

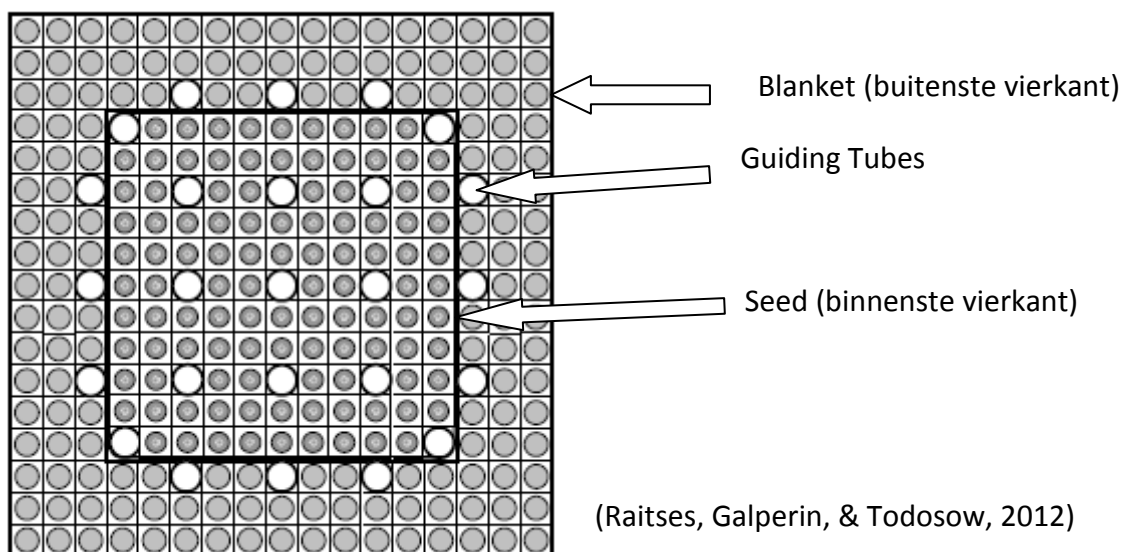
Bij het ontwikkelen van deze fuel zijn er enkele beperkingen opgelegd: (1) de brandstof dient volledig compatibel te zijn met de bestaande energiecentrales. Enkel kleine aanpassingen mogen doorgevoerd worden aan de hardware van energiecentrales. Waaronder de hefkraan, dit wordt later besproken. (2) Alle veiligheidsnormen moeten behouden worden, de brandstof mag zeker niet gevaarlijker zijn dan het huidige uranium dioxide. (3) *Reprocessing* van de te implementeren brandstof wordt niet toegestaan, dit wordt ook wel de *once-through-cycle* genoemd (Raitses, Galperin, & Todosow, 2012).

Het bedrijf Lightbridge Corporation heeft deze normen in acht genomen en de *Radkowsky Thorium Fuel* verder ontwikkeld op zo'n manier dat de brandstof mits een kleine aanpassing in de huidige kerncentrales gebruikt kan worden. De kerncentrales dienen wel voorzien te zijn van PWR's. De aanpassing houdt in dat de hefkraan die de brandstof assemblies manoeuvreert aangepast moet worden zodat ze de assemblies kan plaatsen volgens de vereisten van de RTF. De modificatie brengt met zich mee dat de kraan zowel gehele als subassemblies kan manoevreren zonder veel tijd te verliezen. Subassemblies zijn de *seed & blanket* staven. De 'oude' kraan kon geen subassemblies verplaatsen (Malone, Radkowsky Thorium Fuel, 2014).

#### Ontwerp

De *Radkowsky Thorium Fuel* steunt op een *seed & blanket* configuratie. Hierbij is het van belang dat de uranium- en thorium-brandstofzones gescheiden blijven. De centrale regio (= *seed*) van de assembly bevat verrijkt uranium, de omringende regio (= *blanket*) bevat echter een mengsel van  $\text{ThO}_2$  en verrijkt uranium. De *seed* regio neemt ongeveer 40% van het volume in, met als gevolg dat de *blanket* dan de overige 60% dekt. Figuur 1 verduidelijkt dit (Raitses, Galperin, & Todosow, 2012).

Figuur 1: Configuratie brandstofstaven van RTF voor een PWR



Een belangrijk gegeven in deze brandstofconfiguratie is de ratio tussen het moderatorvolume (water) en het brandstofvolume. De verhouding van moderator tot brandstof ( $V_m/V_f$ ) van de *seed* regio bedraagt 3 terwijl die van *blanket* regio echter 1,67 bedraagt. Dit verschil heeft zijn weerslag in de gereduceerde plutonium productie in de *seed* regio en verbetert de U-233 productie en verbranding in de *blanket* regio. Om een lage plutonium productie te verkrijgen is een hoge  $V_m/V_f$  ratio vereist in de *seed* regio. De *seed* regio is verantwoordelijk om de reactor draaiende te houden en om de benodigde cyclus lengte te behalen, bijkomend zorgt de *seed* regio voor thermische neutronen (bezitten lage bewegingsenergie) die de *blanket* regio gebruikt. Om deze neutronen zo efficiënt mogelijk af te geven aan de *blanket* regio is tevens weer de hoge  $V_m/V_f$  ratio in de *seed* regio vereist (Raitses, Galperin, & Todosow, 2012).

De *seed* brandstofstaven bevatten  $UO_2$  pellets waarvan het uranium voor 20% verrijkt is, dit is de geaccepteerde non proliferatie limiet. De pellets worden omgeven door de zirkoniumlegering, tevens de buitenkant van de brandstofstaven. De *seed* regio produceert ongeveer 60% van de totale kracht, dit brengt met zich mee dat de vermogensdichtheid in de *seed* regio relatief hoog is (Raitses, Galperin, & Todosow, 2012).

De *blanket* brandstof bestaat uit brandstofstaven die een mix bevatten van  $ThO_2$  en  $UO_2$ . De  $UO_2$  component neemt 13% van het totale volume in (de rest is  $ThO_2$ ) en het uranium is voor 12,2% verrijkt. Dit uranium is bij de *blanket* brandstof toegevoegd omdat thorium van nature uit geen splijtbaar stof is, toevoeging van verrijkt uranium maakt dat er door splijting van dit uranium neutronen vrijkomen die een 'kickstart' geven voor de splijting van thorium (Raitses, Galperin, & Todosow, 2012).

Het brandstof management is verschillend van een gewone brandstofconfiguratie. De *seed* en de *blanket* brandstof verblijven elk voor een verschillende tijdspanne in de reactor. De *seed* volgt het schema van een standaard PWR, om de 18 maanden wordt er een oude batch vervangen door een nieuwe batch in de *seed*. Een *seed* bestaat uit 3 batches. De *blanket* is een *single-batch* en verblijft 9 jaar in de reactor wat overeenkomt met 6 *seed reloads* voor een 18 maanden *seed* cyclus. (Raitses, Galperin, & Todosow, 2012)

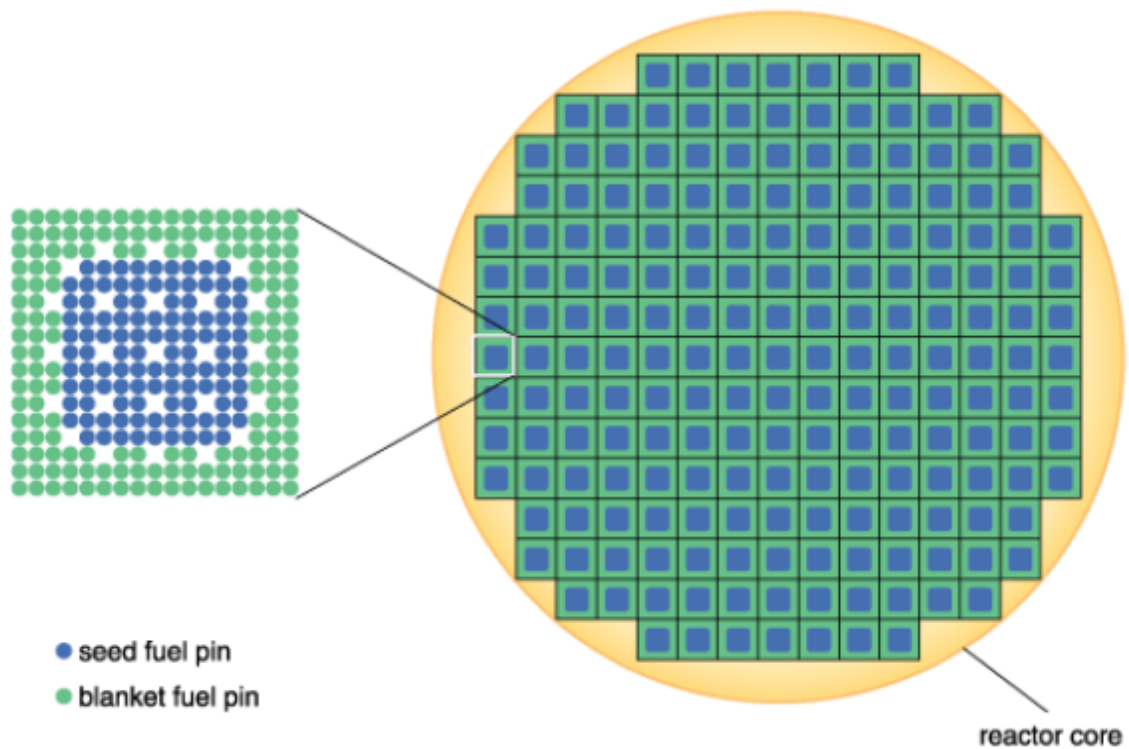
In de volgende tabel worden de ontwerp parameters weergegeven van een 17x17 *seed en blanket assembly* voor een PWR. Een reactor bestaat uit tientallen assemblies. Figuur 2 illustreert dit, links wordt een assembly weergegeven. De groene bolletjes stellen de *blanket* regio voor, de blauwe echter de *seed* regio. Rechts in de figuur wordt weergegeven hoe de kern van een *Pressurized Water Reactor* wordt opgebouwd uit brandstof assemblies (Raitses, Galperin, & Todosow, 2012).

Tabel 1: Opbouw RTF

Parameter	PWR	
	Seed	Blanket
Brandstof samenstelling	UO <sub>2</sub> met U = 20% verrijkt	(U+Th)O <sub>2</sub> met UO <sub>2</sub> = 0,13% van het volume U= 12,2% verrijkt
Aantal fuel rods	108	156
Aantal guide tubes	13	12
Moderator tot brandstof volume ratio	3	1,67
Geometrie brandstofconfiguratie	Vierkant	

(Raitses, Galperin, & Todosow, 2012)

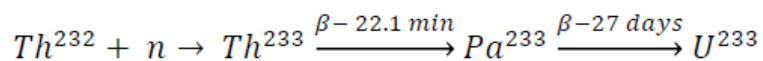
Figuur 2: Grafische voorstelling brandstofconfiguratie RTF



(Schopflin, 2011)

### *Splijting Thorium*

Thorium, Th-232 is een niet splijtbaar stof. Het element kan wel door middel van een neutron te absorberen omvormen tot een splijtbaar element. Na absorptie van een neutron dient Th-233 nog twee keer bèta-verval te ondergaan om de gewenste isotoop U-233 te creëren. Dit bèta verval houdt in dat een neutron overgaat in een proton en er komt een elektron vrij. Bij het eerste bèta verval vormt Th-233 zich om tot Pa-233 ofwel protactinium genoemd. Het tweede verval is verantwoordelijk voor de omvorming naar Uranium-233. Dit uranium is splijtbaar en door splijting van U-233 haalt de RTF-cyclus zijn energie. De component van U-235 is U-238. Deze laatste is ook een fertiele stof net als Th-232. Dus bij absorptie van één of meerdere neutronen zal deze instaan voor de vorming van het splijtbaar Pu-239 of Pu-241. Het element Th-232 absorbeert makkelijker neutronen dan U-238 met als gevolg dat thorium sneller en efficiënter het splijtbaar U-233 produceert dan dat U-238 plutonium produceert (Elkhadrawi, 2008).



De productie van de splijtbaar stof U-233 uit Th-232 vindt plaats tijdens bestraling van neutronen. Daarom dient de brandstof niet enkel uit thorium te bestaan maar ook uit splijtbaar stoffen (verrijkt uranium). Deze zal de reactie op gang brengen in de reactor. Daarom dat de *seed* brandstofstaven bestaan uit 20% verrijkt uranium, ook in de *blanket* brandstofstaven is verrijkt uranium aanwezig (Elkhadrawi, 2008).

## 2.4 Back end

Om de benedencyclus (back end) van de nucleaire industrie te bespreken dient er eerst onderscheid gemaakt te worden tussen de verschillende soorten nucleair afval. Deze zullen eerst besproken worden, daarna wordt uitgelegd gedaan hoe de verwerking van hoog radioactief afval in z'n werk gaat, deze is hetzelfde voor uranium dioxide als voor de thorium brandstof.

### 2.4.1 Laag radioactief afval

Dit radioactief afval bevat een kleine hoeveelheid radioactiviteit. Het afval is meestal afkomstig van ziekenhuizen, laboratoria en de industrie. Desalniettemin wordt ook een deel van dit afval gegenereerd door alle stadia die doorlopen worden bij het opwekken van elektriciteit door middel van kernsplijting (World Nuclear Association, 2014).

Dit afval omvat allerhande materialen: papier, gereedschap, kledij, filters, protectie lakens en gereedschap dat gebruikt werd voor het onderhoud van een centrale. Zelfs bestanddelen zoals pijpen en andere bestanddelen van een kerncentrale kunnen tot deze categorie behoren. Dit radioactief afval representeert namelijk 90% van het totale radioactief afval. Ondanks de enorme hoeveelheid bevat het maar 1% van alle radioactieve straling. Noteer wel dat het hier gaat om het globale plaatje en niet enkel het afval gegenereerd door kerncentrales (World Nuclear Association, 2014).

### 2.4.2 Middel radioactief afval

Middel radioactief afval bevat een hogere radioactiviteit, het vereist een beschermingschild wanneer men het behandelt. Dit afval is voornamelijk afkomstig van een nucleaire centrale. Het bestaat meestal uit allerlei stoffen zoals chemisch slib en brandstofbekleding en andere ionenwisselingsharsen (bijlage 8) die werden gebruikt om het water in de reactor te reinigen. Ook bij het ontmantelen van een reactor, worden sommige delen van de reactor bestempeld als middel radioactief afval (World Nuclear Association, 2014).

### 2.4.3 Hoog radioactief afval

Dit afval wordt enkel gegenereerd door het splijten van uranium in een nucleaire reactor. Dit afval moet met heel veel zorg behandeld worden. Het is uiterst radioactief omdat het verscheidene splijtbare elementen bevat. Het grootste deel (95%), van alle radioactiviteit die geproduceerd wordt tijdens de elektriciteitsproductie, is afkomstig van hoog radioactief afval. Het beschikt over zowel langlevende als kortlevende elementen. Dit verschil valt te verklaren door de halfwaardetijd dat elk element heeft. Zo heeft bijvoorbeeld Pu-239 een halfwaardetijd van 24.000 jaar en Pu-241 heeft er één van 14,4 jaar (World Nuclear Association, 2014).

### *Verwerking van hoog radioactief afval*

Nadat de splijtstofstaven opgebruikt zijn en ontheven worden uit de reactor dienen ze eerst af te koelen in de tijdelijke opslag. Met tijdelijke opslag wordt verwezen naar de opslagplaats in een kerncentrale. Deze kan zich zowel bevinden in een goed afgesloten loods op het terrein van de kerncentrale of soms in het gebouw zelf. Dit wordt ook wel een splijtstofdok genoemd. Er zijn ook tijdelijke opslagplaatsen die bestaan uit een loods met ingebouwde bassin (Tihange). In deze bassin wordt de opgebruikte brandstof geplaatst. Meestal is de splijtstof nog niet verwerkt als ze zich in de splijtstofdokken bevindt van een kerncentrale. Hier dient ze eerst af te koelen en een deel van haar radioactiviteit te verliezen vooraleer ze verwerkt kan worden (Thompson, 2010).

Voor de verwerking van de splijtstofstaven gebruikt men meestal het proces dat ook wel verglazing (bijlage 9) genoemd wordt. Om de afgedankte brandstof op een veilige manier te conserveren moet het in een onoplosbare vaste vorm verwerkt worden en deze vorm dient enkele duizenden jaren stabiel te blijven. Het proces begint bij het drogen van het nucleair afval, dit gebeurt door verwarming. Op dat moment is het nucleair afval nog in vaste vorm. Vervolgens wordt het afval gemengd met glasvormende chemicaliën. De mix wordt vervolgens nog eens opgewarmd tot een temperatuur van ongeveer 1000°C zodat de mix gaat smelten. Dit gesmolten mengsel wordt dan in een insluitingvat gegoten, hierin koelt het af tot glas. Deze container of vat wordt dan verzegeld en ontsmet (bijlage 9) Eenmaal deze activiteiten zijn afgerond kan het afval geplaatst worden in een lange termijn opslag (Thompson, 2010).

## Hoofdstuk 3: Kosten

Deze sectie behandelt de kostencyclus van de nucleaire brandstof. Er wordt een vergelijking gemaakt tussen de Belgische uranium cyclus en de Radkowsky thorium cyclus. Voor deze vergelijking wordt telkens de jaarlijkse kost van een typische 1 GWh *Pressurized Water Reactor* berekend. Deze jaarlijkse kost wordt dan herleid naar de kost voor het opwekken van 1 MWh.

Het verkrijgen van cijfers over de nucleaire sector is zeer moeilijk. De bedrijven die betrokken zijn in de uranium cyclus geven niets vrij. Electrabel noch Synatom noch het SCK wil of kan data vrijgeven in verband met de kosten die gerelateerd zijn aan deze cyclus. De twee voornaamste redenen waarom ze de gegevens niet vrijgeven zijn enerzijds de bescherming van commerciële gegevens en anderzijds worden ze omwille van veiligheidsredenen niet publiekelijk gemaakt. De enige cijfers over de nucleaire cyclus in België zijn gepubliceerd in (Nationale Bank van België, 2011). De kosten van de uranium cyclus voor de rest van de wereld zijn door (World Nuclear Association, 2014) en (Du Toit, 2013) gepubliceerd. Omdat het zo moeilijk is om aan deze informatie te geraken dient men in rekening te nemen dat de kosten die gebruikt zijn in deze berekening soms afkomstig zijn uit verschillende studies.

Eerst wordt er een vergelijking gemaakt tussen de kostprijs in België en de wereldprijs voor uranium dioxide brandstof. Daarop volgt een kostenberekening van de Radkowsky *Thorium Fuel cyclus*. Om dan te besluiten met een algemene kostenvergelijking tussen de beide cyclussen.

### 3.1 Kosten uranium dioxide brandstof in België

In de tabel hieronder staan de cijfers uit de publicatie van de nationale bank.

Tabel 2: Jaarlijkse brandstofkost België

Activiteit	Jaarlijkse kost ( miljoen Euro)	Brandstofkosten (€/MWh)
Front end	114,2	2,49
Fabricatie	45,85	1,00
Back end	96,94	2,12
Totaal	256,99	5,61

(Nationale Bank van België, 2011)



Tabel 3: Reactors België

Reactor	Centrale	MW (netto capaciteit)	Merk reactor	Jaarlijkse theoretische productie (MWh)*
Doel-1	PWR	392,5	WE 2-LOOP	3.025.704,0
Doel-2	PWR	433	WE 2-LOOP	3.337.910,4
Doel-3	PWR	1.006	WE 3-LOOP	7.755.052,8
Doel-4	PWR	1.008	WE 3-LOOP	7.770.470,4
Tihange-1	PWR	962	Framatome 3-LOOP	7.415.865,6
Tihange-2	PWR	1.008	WE 3-LOOP	7.770.470,4
Tihange-3	PWR	1.055	WE 3-LOOP	8.132.784,0
Totaal				45.208.258,0

\* Gemiddelde bezettingsgraad voor nucleaire eenheden in België 88%.

(CREG, 2010), (International Atomic Energy Agency, 2014)

Voor de kostenberekening van het CREG (cijfers in publicatie Nationale Bank) na te vloeien wordt er gekeken naar de kost van een typische 1 GWh *Pressurized Water Reactor*. Hiervoor zal Doel-4 gebruikt worden. Zoals in bovenstaande tabel aangegeven is dit een Westinghouse 3-LOOP reactor met een jaarlijkse theoretische productie van 7.770.470,4MWh. Om tot de jaarlijkse totale kosten van Doel-4 te komen wordt de jaarlijkse theoretische productie van Doel-4 gedeeld door de totale jaarlijkse theoretische productie van België. De quotiënt bedraagt 17,2%. Vervolgens wordt dit getal vermenigvuldigd met de jaarlijkse kosten.

Tabel 4: Jaarlijkse kost Doel-4

Activiteit	Jaarlijkse kost (Miljoen €)	Deelname Doel-4 totale energieproductie (%)	Jaarlijkse Kosten Doel-4 (Miljoen €)
Front end	114,20	17,2	19,64
Fabricatie	45,85	17,2	7,89
Back end	96,94	17,2	16,67
Totaal			44,20

De totale kost gerelateerd aan de brandstof van Doel-4 bedraagt 44,20 miljoen euro. Om een beter beeld te krijgen van dit enorme getal wordt de totale jaarlijkse kost herleid naar de eenheid €/MWh. Dit door de totale jaarlijkse kost te delen door de jaarlijkse theoretische productie van Doel-4. Omzetten naar geldeenheid/MWh zal telkens via de jaarlijkse theoretische productie van Doel-4 geschieden . Na uitvoering van deze bewerking wordt er een kost van 5,69€/MWh bekomen voor de energieproducent. Dit getal bestaat voor 3,54€/MWh uit de kosten voor de bovcyclus + fabricatie en het overige gedeelte 2,15€/MWh zijn de kosten voor de verwerking en opslag van de opgebruikte brandstof. Deze cijfers komen dicht in de buurt van diegene gepubliceerd door het CREG. In de onderstaande vergelijking worden de cijfers van het CREG gebruikt.

De meest recente cijfers van de front end zijn vrijgegeven door de World Nuclear Association. Deze cijfers reflecteren echter de wereldprijs op juni 2013. Ook voor de back end worden de meest recente cijfers gebruikt, deze zijn echter niet afkomstig van de World Nuclear Association omdat zij niet beschikken over deze kosten. De paper (Du Toit, 2013) heeft ze wel gepubliceerd. Deze tweede berekening wordt aangevat om de wereldprijs te kennen van de uranium dioxide brandstofcyclus. Onderstaande tabel geeft een overzicht van de kost voor de front end activiteiten bij wereldprijs om een Westinghouse 3-LOOP reactor volledig te voorzien van brandstof (3 batches).

Tabel 5: Kost gehele brandstof unit wereldprijs

Activiteiten	World Nuclear Association (2013)	Hoeveelheid (ton)	Kosten gehele brandstof unit World Nuclear Association (Miljoen \$)
Uranium (U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	130\$/kgU	591,06	76,84
Conversie	11\$/kgU	498,08	5,48
Verrijking	120\$/SWU <sup>1</sup>	484,80	58,18
Productie brandstofstaven	240\$/kgHM <sup>2</sup>	66,41	15,94
<b>Totaal</b>			<b>156,44</b>

(World Nuclear Association, 2014), (Westinghouse Electric Corporation, 1984)

<sup>1</sup> SWU: Separative Work Unit

<sup>2</sup> HM: Heavy Metal

In een Westinghouse 3-Loop Reactor wordt 66.411kg brandstof gebruikt in de kern. Volgens de World Nuclear Association heeft men 8,9kg U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> nodig om 1kg bruikbare brandstof te produceren of 591.057,9kg U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> om 66.411kg aan brandstof te fabriceren. De omrekeningsfactor wordt voor elke activiteit weergegeven in volgende tabel:

Tabel 6: Gewichtsverlies front end uranium

Activiteit	Gewicht
Uranium (U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	8,9kg
Conversie	7,5kg
Verrijking	7,3kg
Bruikbare brandstof	1 kg

(World Nuclear Association, 2014)

Bovenstaande tabel geeft weer dat er door het verrijken van uranium het meeste gewichtsverlies van het oorspronkelijke U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> plaatsvindt. Een verlies van wel meer dan zes kilogram.

Zoals hierboven reeds aangehaald zijn dit niet de echte jaarlijkse kosten. Aangezien onze huidige reactoren over een speciaal *refuelling* schema beschikken. Zo wordt er om de 18 maanden een oude batch vervangen door een nieuwe. Om de brandstof volledig te vervangen heeft men drie batches nodig. Dus voor de berekening van de jaarlijkse kost wordt de totale kost van de front end activiteiten gedeeld door 4,5 (3 keer 18 maanden). Hierdoor verkrijgt men een kost van 34,76 miljoen Dollar. Deze wordt dan herleid naar \$/MWh, dit geeft 4,47\$/MWh.

Voor de back end zijn er cijfers verkregen via de wetenschappelijke literatuur (Du Toit, 2013) gepubliceerd door North-West University (NWU) in juni 2013. Onderstaande tabel zorgt voor verduidelijking.

Tabel 7: Back end kost wereldprijs

Activiteit	NWU	Hoeveelheid per batch(18maanden)(ton)	Hoeveelheid per jaar (ton)	Kosten per jaar (Miljoen \$)
Storage of spent fuel	187,5\$/kgU	22.1	14.8	\$2.77
Disposal of spent fuel	536\$/kgU	22.1	14.8	\$7.91
Totaal				\$10.68

(Du Toit, 2013)

De totale kost van de back end cyclus bedraagt 10,68 miljoen Dollar. Om een beter beeld te krijgen van dit enorme getal wordt de totale kost per batch herleid naar de eenheid \$/MWh. Na omrekening wordt er 1,37\$/MWh voor de back end cyclus bekomen.

Tabel 8: Kost wereldprijs

Activiteit	Kosten (\$/MWh)
Front end (WNA,2013)	4,47
Back end (NWU,2013)	1,37
Totaal	5,84

Nu kunnen de drie kosten naast elkaar gezet worden. Ten eerste wordt een vergelijking gemaakt tussen de kostenberekening van de Commissie voor de Regulering van de Elektriciteit en het Gas (CREG) en de eigen berekening. Zo blijkt dat bij de eigen berekening de kost acht cent hoger ligt. Ondanks dezelfde gegevens gebruikt werden. Dit verschil is te wijten aan de totale jaarlijkse productie dat gebruikt werd in de berekening. Het CREG gebruikt een grotere jaarlijkse productie, namelijk 45,82 TWh, terwijl er in deze berekeningen en de daaropvolgende berekeningen een productie van 45,2 TWh gebruikt wordt. Dit in rekening genomen maakt dat de berekeningswijze overeenkomt met die van het CREG (CREG, 2010); (Nationale Bank van België, 2011).

Indien de kosten van België en die van de wereldprijs naast elkaar gelegd worden kan er nog niets afgeleid worden aangezien de wereldprijs is berekend op een ander tijdstip en met een andere munteenheid. Er dient echter rekening gehouden te worden met de index en de wisselkoers. Op het einde van dit hoofdstuk zullen alle kosten naast elkaar gelegd worden rekening houdende met de index en de wisselkoers.

Tabel 9: Vergelijking tussen België en de wereld

Activiteit	Kosten België CREG (€/MWh)	Kosten België (€/MWh)	Kosten wereldprijs (\$/MWh)
Front end	3,49	3,54	4,47
Back end	2,12	2,15	1,37
Totaal	5,61	5,69	5,84

Op basis van kosten uit 2007 gepubliceerd in (Nationale Bank van België, 2011).

## 3.2 Kosten Radkowsky Thorium Fuel

Het achterhalen van de kosten van deze brandstofcyclus was ook niet vanzelfsprekend. Zoals eerder aangehaald is het zeer moeilijk om aan cijfers te geraken over een nucleaire cyclus want deze worden om veiligheidsredenen niet vrijgegeven. De tabellen hieronder zijn samengesteld uit cijfers verkregen van de World Nuclear Association en van Lightbridge Corporation. De hoeveelheden die hier gebruikt worden, zijn verkregen via de bron (Busse, 2000) die dateert uit mei 2000. Voor de back end kosten wordt echter dezelfde prijs gebruikt als diegene die gebruikt werd voor de back end van de uranium dioxide cyclus. Dit omdat beide afvalproducten dezelfde verwerking dienen te ondergaan.

Tabel 10: Front end thorium

Seed			
Activiteit	Kost (\$/kg)	Hoeveelheid (Kg/assembly)	Kost per assembly (Duizend \$)
Uranium (U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	130	2.422	314,9
Zirkonium	30	68	2,0
Conversie	11	2.410	26,5
Verrijking	110	2.339	257,3
Fabrication	330 \$/rod	108 rods/assembly	35,6
Totaal			636,3

(Busse, 2000); (World Nuclear Association, 2014); (Malone, Radkowsky Thorium Fuel, 2014)

Blanket			
Activiteit	Kost (\$/kg)	Hoeveelheid (Kg/assembly)	Kost per assembly (Duizend \$)
Uranium (U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	130	895	116,4
Thorium	85	229	19,5
Conversie	11	890	9,8
Verrijking	110	839	92,3
Fabrication	350 \$/rod	156 rods/assembly	54,6
Totaal			292,6

(Busse, 2000); (World Nuclear Association, 2014); (Malone, Radkowsky Thorium Fuel, 2014)

Door berekening komt de totale front end kost per assembly neer op 928.900 Dollar. De Westinghouse 3-LOOP reactor beschikt over 157 assemblies. De brandstofstaven in de assembly worden elk op een bepaald tijdstip vervangen. Zo wordt er om de 18 maanden één derde van de *seed* brandstofstaven vervangen door nieuwe. Dus één batch *seed* brandstofstaven zal zo'n 4,5 jaar actief zijn in de reactor, nadien worden ze verwijderd. De *blanket* brandstofstaven verblijven allen 9 jaar lang in de reactor. Bij het verlopen van deze 9 jaar zullen ze allen vervangen worden door nieuwe *blanket* brandstofstaven. Deze verblijftijden van de verschillende brandstofstaven zijn dan ook opgenomen in de berekening. Onderstaande tabel geeft dit weer.

Tabel 11: Kost front end thorium

	Kost (\$)	Omrekenings- factor naar 1 jaar	Kost (Duizend \$) (assembly/jaar)	Aantal assemblies per reactor	Jaarlijkse kost front end (Miljoen \$)
Seed	636,3	1/4,5	141,4	157	22,20
Blanket	292,6	1/9	32,5	157	5,10
Totaal					27,30

Tabel 12: Back end gewicht thorium

	Seed	Blanket
Gewicht (kg)	123	254
Aantal assemblies	157	157
Totaal (kg)	19.311	39.878
Totaal op 9 jaar (kg)	38.622	39.878
Totaal Seed & Blanket (kg)	78.500	
Totaal op 1 jaar (kg)	8.722	

(Busse, 2000)

Voor de back end kosten wordt het gewicht per *seed en blanket assembly* als referentiepunt van de berekening gebruikt. Hieruit kan het totale gewicht van de brandstof berekend worden die de komende 9 jaar in de reactor aanwezig zal zijn. Het totale gewicht van de seed 19.311 kilogram bestaat uit 3 batches waarvan telkens één vervangen wordt elke 18 maanden, dus dit gewicht dient dubbel genomen te worden om de negen jaren te overspannen. Dit totale gewicht voor 9 jaar wordt herleid naar 1 jaar. Deze 8.722 kilogram omvat de totale verbruikte brandstof dat een Westinghouse 3-LOOP reactor zou gebruiken met Radkowsky Thorium brandstofconfiguratie.

Opmerkelijk is de reductie van de totale verbruikte brandstof. Het gebruik van thorium in een PWR brengt een reductie van 54.322 kilogram met zich mee over een tijdspanne van 9 jaar. Dit komt overeen met een daling van 40%. Deze reductie in verbruikte brandstof is te verklaren door de betere verbranding en de lange verblijftijd van de *blanket*. Dit maakt dat de back end kosten van thorium dan ook goedkoper zijn dan die van uranium. De behandelingskosten van de verbruikte thorium brandstof zijn echter dezelfde als die van de uranium dioxide cyclus.

Tabel 13: Kost back end thorium

Activiteit	NWU	Hoeveelheid per jaar (kg)	Kosten per jaar (Miljoen \$)
Storage of spent fuel	187,5\$/kgU	8.722	1,64
Disposal of spent fuel	536\$/kgU	8.722	4,67
Totaal			6,31

(Du Toit, 2013)

Onderstaande tabel verduidelijkt het kostenplaatje voor het implementeren van Radkowsky thorium brandstof. De kosten worden omgerekend naar de eenheid (\$/MWh) volgens de gekende jaarlijkse theoretische productie van Doel-4.

Tabel 14: Kost thorium

	Jaarlijkse kost (Miljoen \$)	Kosten (\$/MWh)
Front end	27,30	3,51
Back end	6,31	0,81
Totaal	33,61	4,32

De tweede bron waaruit cijfers zijn verkregen staan in onderstaande tabel. Deze zijn gepubliceerd door (International Atomic Energy Agency, 2005).

Tabel 15: Kosten Thorium International Atomic Energy Agency

	Kosten (\$/MWh)
Front end	3,60
Back end	0,55
Totaal	4,15

(International Atomic Energy Agency, 2005)

### 3.3 Vergelijking uranium versus thorium:

Voor beide brandstofconfiguraties (uranium dioxide cyclus en RTF-cyclus) zijn er 2 vooropgestelde berekeningen gegeven. De eerste is verstrekt door de Nationale Bank van België voor de uranium dioxide cyclus en de tweede wordt gegeven door het International Atomic Energy Agency (International Atomic Energy Agency, 2005). De twee andere zijn berekeningen opgesteld uit de meest recente gegevens die zijn vrijgegeven. Er dient echter bemerkt te worden dat deze gegevens (tabel 15) louter een indicatie van de prijs geven. De prijzen die de Europese brandstof fabrikant Areva (voorziet België van brandstof) hanteert worden niet vrijgegeven.

Tabel 16: Kosten uranium vs thorium

Activiteit	Uranium dioxide brandstof		Radkowsky Thorium brandstof	
	Kosten België CREG (2007) (€/MWh)	Kosten Wereldprijs (2013) (\$/MWh)	Kosten Wereldprijs IAEA (2005) (\$/MWh)	Kosten Wereldprijs WNA, Lightbridge, NWU (2013) (\$/MWh)
Front end	3,49	4,47	3,60	3,51
Back end	2,12	1,37	0,55	0,81
Totaal	5,61	5,84	4,15	4,32

Bovenstaande kosten zijn opgesteld uit bronnen die verschillen van jaartal. Dus om een gestaafe vergelijking te maken dient er rekening gehouden te worden met de index. Daarenboven hebben niet alle gegevens dezelfde munteenheid. Er dient dus ook rekening gehouden te worden met de wisselkoers. In tabel 16 wordt er rekening gehouden met beide aspecten. Er zijn echter 2 manieren om de kosten vergelijkbaar te maken:

#### Methode 1:

Eerst wordt de index berekend zodat de kostprijs van 2014 wordt verkregen. Nadien worden de kosten in Dollar via de huidige wisselkoers omgezet naar Euro.

#### Methode 2:

Eerst worden alle kostprijzen omgezet naar Euro. Vervolgens wordt de index berekend zodat de kostprijs van 2014 wordt verkregen.



Tabel 17: Vergelijking kosten methode 1 versus methode 2

	Uranium dioxide brandstof				Radkowsky Thorium brandstof			
	Kosten België CREG (2007)		Kosten Wereldprijs (2013)		Kosten Wereldprijs IAEA (2005)		Kosten Wereldprijs WNA, Lightbridge, NWU (2013)	
Activiteit	(1)*	(2)**	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
Front end (€/MWh)	3,95	3,95	3,30	3,45	3,18	3,32	2,59	2,71
Back end (€/MWh)	2,40	2,40	1,01	1,05	0,48	0,51	0,60	0,62
Totaal(€/MWh)	6,35	6,35	4,31	4,50	3,66	3,83	3,19	3,33

\*(1) : Methode 1

\*\* (2) : Methode 2

De totale kostprijs voor de Radkowsky Thorium brandstof is echter veel kleiner dan die van de uranium dioxide brandstof. Dit is te wijten aan de verschillende lengte van brandstofcyclus. Zo verblijft de blanket, die 60% van het totale volume inneemt voor 9 jaar in de reactor. Dit brengt met zich mee dat er minder grondstoffen nodig zijn om de reactor draaiend te houden. Ook in de afvalverwerking heeft dit zijn weerslag, de thorium brandstof produceert veel minder afval, 40% minder dan de conventionele uranium dioxide brandstof. Daarom dat de front en back end kosten lager liggen voor de Radkowsky Thorium brandstof.

De kostprijzen van zowel de uranium dioxide cyclus als die van de RTF-cyclus zijn normaal verdeeld, dus kan er een 90% betrouwbaarheidsinterval opgesteld worden ter berekening van de gemiddelde kostprijs van de uranium dioxide cyclus en van de RTF-cyclus. Hieronder zijn de intervallen (in €/MWh) van de gemiddelde brandstofprijzen geprojecteerd, de berekening is terug te vinden in bijlage 7.

Methode 1:

- Interval Uranium dioxide: {4,15; 6,51}
- Interval RTF: {3,15; 3,71}

Methode 2:

- Interval Uranium dioxide: {4,35; 6,51}
- Interval RTF: {3,27; 3,89}

# Hoofdstuk 4: Weerstand tegen Proliferatie

## 4.1 Algemeen

Nucleaire energie vertegenwoordigt de dag van vandaag 11% van de globale energievoorziening. Dit brengt met zich mee dat er een groot potentieel risico is voor de aanmaak en uitbreiding van nucleaire wapens. Één van de bijkomstige doelen van de commerciële nucleaire splijtstofcyclus bestaat eruit om de proliferatie zoveel mogelijk tegen te gaan. De link tussen nucleaire wapens en de commerciële nucleaire splijtstofcyclus is het nucleair afval dat verwerkt kan worden tot bruikbaar materiaal voor kernwapens. Om dit tegen te gaan zijn er twee soorten barrières, de intrinsieke en de extrinsieke barrières (International Atomic Energy Agency, 2005).

Intrinsieke barrières doelen vooral op het materiaal en het technische aspect, het is echter zeer moeilijk om een nucleair explosief te vervaardigen. Dit omdat er zeer veel knowhow voor nodig is, daarbij komt dan nog het technische aspect en allerhande machines die nodig zijn voor het vervaardigen. Daarenboven moet men ook nog aan het splijtbare materiaal kunnen geraken. De extrinsieke barrière wordt vertegenwoordigd door de maatregelen die de overheid neemt om nucleaire proliferatie tegen te gaan (International Atomic Energy Agency, 2005).

### 4.1.1 Eigenschappen splijtbare kernen in nucleaire wapens

Om nucleaire wapens te produceren dienen er enkele eigenschappen van het te gebruiken materiaal in acht genomen te worden. De eerst restrictie is de kritieke massa van de stof, deze dient zo laag mogelijk te zijn, ten tweede wordt er gekozen voor een lage straling van splijtbare kernen en als laatste beperking wordt een lage neutronen emissie op prijs gesteld (HowStuffWorks, 2014).

De kritieke massa komt overeen met de minimum hoeveelheid splijtbare stof die nodig is om een kettingreactie tot stand te brengen. Logischer wijze dient deze massa zo laag mogelijk te liggen voor de productie van nucleaire wapens. Hoe minder materiaal nodig hoe beter. Tevens dient de dichtheid van de stof zo hoog mogelijk te zijn. Waarom dit zo is, wel hoe dichter de atomen op elkaar gepakt zijn, hoe makkelijker er een volgende of meerdere splijtingen zullen plaatsvinden. In superkritische toestand zullen er per nieuwe splijtingsreactie meer dan één nieuwe splijting plaatsvinden (kettingreactie). In een kernwapen worden de splijtbare kernen in pakjes die kleiner zijn dan de kritieke massa samengepakt. Op het punt van detonatie zal een ontploffing(implosie) of het inschieten(gun type)(bijlage 10) van een subkritische massa op een andere, de splijtbare kernen bij elkaar duwen waardoor een superkritische massa wordt bereikt. Vervolgens zal er zich een explosieve kettingreactie voordoen, de ontploffing van het kernwapen (HowStuffWorks, 2014).

De straling van de te gebruiken splijtbare kernen dient laag te zijn, dit omdat er anders teveel problemen optreden voor het bewerken ervan. Bij te hoge straling dient er teveel geïnvesteerd te worden in bescherming (shielding), terwijl er andere kernen zijn die veel minder stralen (HowStuffWorks, 2014).

Een lage neutronen emissie van de te gebruiken splijtbare kernen is geprefereerd aangezien bij een te hoge hoeveelheid de behandeling van deze kernen zeer moeilijk wordt. Hoe meer neutronen er worden vrijgegeven hoe meer kans op splijting. Dit kan zelfs leiden tot een zogenaamde ‘fizzle’, dit is een kleine explosie waarbij het wapen wordt vernietigd, maar er vindt geen volledige splijting van de brandstof plaats, het wordt ook predetonatie genoemd. Door de predetonatie zijn er delen van de brandstof nog steeds intact en niet gespleten (HowStuffWorks, 2014) .

Tabel 18: Proliferatie eigenschappen

	Neutronen emissie (n/s.kg)	Straling	Kritieke massa	Commentaar
U-233	1,23	Hoog	16	Straling afkomstig van dochter producten van U-232 (TI-208, Bi-212)
U-235	0,365	Zeer laag	48	Kan gebruikt worden in ‘gun type’ nucleaire wapens
Civiel Plutonium	470.000	Laag tot gemiddeld	13	Onmogelijk om in gun type wapens te gebruiken – zeer moeilijk te gebruiken in implosie wapens.
Weapons-grade Pu	60.000	Zeer laag	11	Enkel gebruikt in implosie wapens.

(Areva, 2008)

Bovenstaande tabel geeft de hierboven besproken eigenschappen in cijfers weer. Het civiel plutonium is plutonium dat meer dan 19% plutonium-240 bevat. Met als gevolg dat dit plutonium niet of zeer moeilijk gebruikt kan worden om er kernwapens van te maken. De tegenhanger *weapons-grade* plutonium bestaat uit minder dan 7% Pu-240. Dit plutonium (vooral Pu-239) dat gebruikt wordt in wapens dient zo weinig mogelijk Pu-240 te bevatten aangezien het een hoge spontane splijtingsratio heeft. Hierdoor komen ook zeer veel neutronen vrij wat het risico op predetonatie verhoogd (Areva, 2008).

De cijfers uit bovenstaande tabel geven aan dat U-233 goed scoort om gebruikt te worden in een kernwapen. Het element heeft een zeer lage kritieke massa en een lage neutronen emissie. Enkel de radiatie van het element is zodanig hoog dat het een zeer moeilijk te behandelen stof is. Deze straling heeft Amerikaanse wetenschappers niet tegengehouden

om een kernbom te vervaardigen met U-233. In 1957 bij *Operation Teapot* is zo de eerste U-233 kernbom succesvol ontploft. Ook U-235 kan gebruikt worden als materiaal voor een kernbom. Al verkiest de ontwikkelaar van kernwapens wel Pu-239 boven U-233 of U-235. Dit omdat Pu-239 over de beste eigenschappen beschikt (Areva, 2008).

### *Uranium dioxide- versus de thorium splijfstofcyclus*

Het gebruik van *Radkowsky Thorium Fuel* zal voor het merendeel de intrinsieke barrières beïnvloeden. Dit omdat enkel de technische en materiële aspecten veranderen, de overheid (extrinsieke barriere) zal weinig andere maatregelen in het leven roepen. De Radkowsky thorium brandstof realiseert non-proliferatie voordelen door middel van een verlengde en verbeterde verbranding van de brandstof. Dit zorgt voor een reductie in de hoeveelheid geproduceerd plutonium en een vermindering in het brandstof verbruik (International Atomic Energy Agency, 2005). De volgende tabel illustreert de reductie van plutonium in de ontladen brandstof:

Tabel 19: Soorten plutonium in gebruikte splijstof

Plutonium isotoop	Typische PWR		Radkowsky Thorium Fuel	
	Kg/GWe-jaar	Fractie Pu (%)	Kg/GWe-jaar	Fractie Pu (%)
238	6	3	5	7
239	124	55	38	47
240	47	21	17	20,5
241	34	15	12	15,5
242	14	6	8	10
Totaal	225	100	80	100

(Brookhaven National Laboratory, 2004)

Bovenstaande tabel geeft heel wat waardevolle informatie weer. Ten eerste valt er te bemerken dat een typische PWR bijna 3 keer zoveel plutonium produceert als een gelijkaardige PWR aangedreven op *Radkowsky Thorium Fuel*. Ten tweede produceert de door de thorium aangedreven reactor in totaal een grotere hoeveelheid even actiniden (Pu-238, Pu-240, Pu-242). Dit plutonium met een even atoomnummer maakt het zeer moeilijk om een goed kernwapen te produceren want Pu-238 produceert enorm veel hitte en Pu-240 en Pu-242 beschikken over een te hoge neutronen emissie (Brookhaven National Laboratory, 2004).

Hieruit kan er besloten worden dat de samenstelling van de verbruikte *Radkowsky Thorium Fuel* minder gunstig is voor het ontwikkelen van kernwapens dan die van een typisch op uranium aangedreven PWR. Dit sluit echter niet uit dat er geen kernwapens vervaardigd kunnen worden uit de verbruikte *Radkowsky Thorium Fuel*. U-233 een component van de verbruikte brandstof werd immers in *Operation Teapot* gebruikt in een kernwapen (Areva, 2008).

# Hoofdstuk 5: Ecologisch aspect

## 5.1 Thorium Reserves

Er wordt aangenomen dat thorium drie tot vier keer meer aanwezig is in onze aardkorst dan uranium. Dit omdat de halfwaardetijd van thorium drie keer langer is dan die van U-238. Met zekerheid kan dit niet gezegd worden aangezien er niet voldoende onderzoek is gedaan naar thorium reserves. Daarentegen zijn er voor uranium al talloze onderzoeken tot stand gebracht om de reserves te lokaliseren. Indien thorium werkelijk met deze enorme hoeveelheden aanwezig is in onze aardkorst dan bevat deze hoeveelheid thorium meer energie dan de som van alle fossiele brandstoffen en uranium samen (Du Toit, 2013).

Tabel 20: Reserves thorium en uranium

	Th <sup>232</sup>	U <sup>238</sup>	Ratio Th/U
Hoeveelheid in zonnestelsel (%)	$1,09 \cdot 10^{-10}$	$2,94 \cdot 10^{-11}$	3,71
Hoeveelheid in oceanen (mg/l)	$1 \cdot 10^{-6}$	0,0032	0,0003
Hoeveelheid in aardkorst (ppm)	9,6	2,7	3,55

(Du Toit, 2013)

Monaziet het fosfaat mineraal is voor een deel opgebouwd uit thorium, het is dan ook de grootste bron van thorium. Het bevat gemiddeld zo'n 6 à 7% thorium en het kan tot 12% thorium bevatten. Globaal zou er ongeveer zo'n 12 miljoen ton monaziet in de aardkorst aanwezig zijn. Dit mineraal wordt veel teruggevonden in stollingsgesteenten en andere rotsen maar het is het meest aanwezig in alluviale afzettingen (materiaal afgezet door een rivier). Het grootste deel van dit monaziet is dan ook gelegen op zuidelijke en oostelijke kusten van India. Tevens beschikken andere landen ook over grote voorraden thorium. Onderstaande tabel geeft geschatte hoeveelheden thorium weer te ontginnen voor een kostprijs van 80\$/kg of minder (World Nuclear Association, 2014).

Tabel 21: Thorium reserves

Land	Aantal ton	Land	Aantal ton
India	846,000	Rusland	155,000
Turkije	744,000	Zuid-Afrika	148,000
Brazilië	606,000	China	100,000
Australië	521,000	Groenland	86,000
Verenigde Staten	434,000	Finland	60,000
Egypte	380,000	Zweden	50,000
Noorwegen	320,000	Kazakstan	50,000
Venezuela	300,000	Andere landen	413,000
Canada	172,000	<b>Wereld totaal</b>	<b>5,385,000</b>

(World Nuclear Association, 2014)

## 5.2 Ontginning

Voor de *Radkowsky Thorium Fuel* dient er zowel uranium, thorium als zirkonium ontgonnen te worden. De hoeveelheid uranium dat deze brandstof nodig heeft is veel kleiner dan bij de gewone uranium dioxide brandstof. Daarentegen dient er wel thorium en zirkonium ontgonnen te worden. Voor de uranium en thorium ontginning wordt de impact op mens(mijnwerker) en natuur besproken. De ontginning van zirkonium wordt niet besproken aangezien hier een geringe hoeveelheid van nodig is in vergelijking met de totale wereldwijde ontginning.

### 5.2.1 Uranium

Bij de ontginning van uranium worden er niet veel extra veiligheidsmaatregelen genomen dan bij het ontginnen van andere ertsen. De mijnwerkers dragen handschoenen en de mijnen worden van ventilatiesystemen en sprayinstallaties voorzien zodat het radon neerdaalt en niet ingeademd wordt. Nochtans kan de radioactiviteit van uranium erts variëren tussen de 500 à 25 miljoen Becquerel per kilogram. De Becquerel (Bq) is een eenheid die wordt gebruikt om de radioactiviteit van een materiaal uit te drukken, hierdoor kan de radioactiviteit van verschillende materialen vergeleken worden. Een Becquerel komt overeen met het verval van één atoom per seconde en elke desintegratie (verval) produceert ioniserende radiatie. De tabel hieronder geeft enkele voorbeelden (Dilorio, Knight, & Mancuso, 2012).

Tabel 22: Radioactiviteit van verschillende materialen

1 adult human (100 Bq/kg)	7000 Bq
1 kg of coffee	1000 Bq
1 kg superphosphate fertiliser	5000 Bq
The air in a 100 sq metre Australian home (radon)	3000 Bq
The air in many 100 sq metre European homes (radon)	up to 30 000 Bq
1 household smoke detector (with americium)	30 000 Bq
Radioisotope for medical diagnosis	70 million Bq
Radioisotope source for medical therapy	100 000 000 million Bq (100 TBq)
1 kg 50-year old vitrified high-level nuclear waste	10 000 000 million Bq (10 TBq)
1 luminous Exit sign (1970s)	1 000 000 million Bq (1 TBq)
1 kg uranium	25 million Bq
1 kg uranium ore (Canadian, 15%)	26 million Bq
1 kg uranium ore (Australian, 0.3%)	500 000 Bq
1 kg low level radioactive waste	1 million Bq
1 kg of coal ash	2000 Bq
1 kg of granite	1000 Bq

(World Nuclear Association, 2012)

Het uranium wordt vooral ontgonnen in ondergrondse mijnen, hierbij lopen de mijnwerkers een verhoogd gevaar op hoge radon-222 niveau's. Ook is de afvalberg bij het ontginnen van uranium groot (Dilorio, Knight, & Mancuso, 2012).

In de jaren negentig werd er een studie gemaakt over de uraniummijn *Vale de Abrutiga* in Portugal. Deze mijn was actief van 1982 tot 1989. Gedurende deze jaren is er via de mijn zo'n 90 ton uranium dioxide uit de aardkorst gehaald. Al het afval en de bijproducten samen die de mijn heeft voortgebracht gedurende deze periode bedragen zo'n 1,4 miljoen ton. De uraniummijn heeft dus een enorme afvalberg geproduceerd, dit was echter niet het grootste minpunt. Aangezien *Vale de Abrutiga* een open pit mijn was, is er in de jaren na de sluiting een meer gevormd in de pit. Het water van het meer is geleidelijk aan in de grond gesijpeld waardoor het zelfs het grondwater heeft aangetast. In een straal van vijfhonderd meter heeft men het water getest en het water was niet drinkbaar noch bruikbaar voor landbouw. Het meer in de pit bevatte veel te hoge concentraties van ijzer, mangaan, radium en lood. Met als gevolg dat het ecosysteem aangetast werd door een slechte en onzorgvuldige ontmanteling van de mijn (Dilorio, Knight, & Mancuso, 2012).

### 5.2.2 Thorium

Thorium wordt vooral teruggevonden in het mineraal monaziet. Meestal wordt monaziet ontgonnen voor de zeldzame aarden die het bevat. Bij deze ontginning wordt thorium beschouwd als radioactief afval. Hier is een geldige reden voor, bij het foutief behandelen van thorium kan dit een bedreiging voor de samenleving vormen. Zo was er van 1949 tot 1992 een grote ontginningsfabriek van zeldzame aarden actief in Brazilië. Wegens de zwakke reglementering van het land kon het bedrijf al zijn afvalproducten opslaan zonder rekening te houden met de publieke gezondheid. Het afval bevatte o.a. hydroxiden van thorium en uranium, met als gevolg dat de grond, het water en de atmosfeer gecontamineerd en vervuild waren. Uiteindelijk moest de fabriek zijn deuren sluiten en ontmanteld worden (Dilorio, Knight, & Mancuso, 2012).

Indien bij de ontginning van zeldzame aarden ook het thorium wordt gebruikt voor o.a. thoriumreactors en het niet als radioactief afval wordt gezien, zal er minder afval zijn bij deze ontginning waardoor ook minder kans op schending van de reglementering inzake de veilige ontginning van zeldzame aarden (Dilorio, Knight, & Mancuso, 2012).

Bij de ontginning van thorium is de productie van radioactief afval tweemaal kleiner dan bij het ontginnen van uranium. Thorium hoeft ook geen conversie noch verrijking om gebruikt te worden in een brandstofstaaf en de bijproducten bij het ontginnen zijn makkelijker te behandelen. Bij thorium ontginning wordt er echter radon-220 of ook thoron genoemd als bijproduct gegenereerd. Deze stof heeft echter een halfwaardetijd van 55,6 seconden. Het bijproduct dat vrijkomt bij de ontginning van uranium is echter radon-222, dit heeft een halfwaardetijd van 3,8 dagen. Dit maakt dat het veel veiliger is thorium te ontginnen omdat de radiatie van thoron sterk afneemt naarmate de afstand van de bron toeneemt. Dit is bij radon-222 niet het geval, deze stof verspreidt zich gelijkmatig in onze atmosfeer. De radiatie van thoron is ook veel makkelijker te blokkeren dan die van radon. Een laagje van 10 centimeter zand of gesteente kan de straling van thoron tegenhouden. De mijnwerkers lopen ook een kleiner risico dan diegene die uranium moeten ontginnen. Dit omdat thorium meestal in een open put wordt ontgonnen in tegenstelling tot de ondergrondse mijnen van uranium, hier kan het radon gehalte soms zeer gevaarlijke niveaus bereiken (Dilorio, Knight, & Mancuso, 2012).

## 5.3 Front end

### 5.3.1 Uranium

Voor de zuivering, conversie en verrijking van uranium is er tussenkomst van de mens nodig. Dus er bestaat een potentieel risico voor zij die de stof behandelen. Om dit risico in kaart te brengen heeft men de werknemers (voormalige en huidige) van Fernald Feed Materials Production Center in Ohio, een processingfabriek van uranium, bestudeerd op kanker en sterftcijfers. De hoeveelheid kankers die zich manifesteerden bij de werknemers was hoger dan het gemiddelde. De blootstelling aan 100mSV bij een leeftijd van 40 jaar of ouder zal sterfte door kanker per twee- of drievoud doen toenemen. Daarom dat in België strenge normen gelden inzake dosislimieten. Zo zullen beroepshalve blootgestelde personen een maximum dosis van 20mSV per jaar mogen ondergaan en in de Verenigde Staten is dit 50mSV. Voor het publiek in België bedraagt de effectieve dosis echter 1mSV (Dilorio, Knight, & Mancuso, 2012); (FANC, 2013).

### 5.3.2 Thorium

Voor thorium vindt de raffinage meestal plaats op de mijnsite zelf. Er is nooit een studie gemaakt over de ecologische impact van een raffinaderij die thorium verwerkt.



## 5.4 Back end

### 5.4.1 Reductie radioactief afval

Zoals reeds aangehaald in de kostensectie zal bij het gebruik van de Radkowsky thorium brandstof het gewicht van het geproduceerde afval teruggedrongen worden met 40%. Dit is te verklaren door de langere verblijftijd van de *blanket* in de reactor en door de betere verbranding van de brandstof. Omdat de *blanket* cyclussen van 9 jaar heeft, zal de brandstof input ook veel kleiner zijn dan bij een conventionele kerncentrale die uranium dioxide als brandstof gebruikt. Deze reductie in gewicht voor de in- en output van de brandstof is ten eerste voordelig voor de operatoren (minder kosten voor het vervoer, de opwerking en verwerking van de brandstof) van de reactors en ten tweede is dit een vooruitgang op ecologisch gebied. Minder brandstof en stralingsafval resulteert in minder gevaar voor mens en milieu (Lightbridge Corporation, 2010).

Dit uit zich op allerlei vlakken. Zo zal er een reductie in het aantal nucleaire transporten teweeggebracht worden, met andere woorden er zal een vermindering in de aanvoer van brandstof assemblies vanuit Frankrijk (Areva) naar België plaatsvinden. De kans op een ramp door een verkeersongeval of een ander incident waarbij de brandstof in de natuur vrijkomt wordt dan ook kleiner. Inzake opslag zal er minder radioactief afval opgeslagen moeten worden, deze kleinere hoeveelheid zou dan ook met nog meer zorg en veiligheid behandeld kunnen worden. Zo zou de kans op een voorval zoals de lekkende vaten in september 2013 te Dessel en Doel kleiner zijn. Na onderzoek blijkt dat er een chemische reactie plaatsvindt in de vaten gevuld met laagradioactief afval. Er vormt zich een soort gel als gevolg van een reactie tussen het beton en omhulsel. De gel loopt uit de vaten en stolt dan, gevaar voor de volksgezondheid is er niet, doch dient dit met zorg behandeld te worden. Dit voorval had misschien vermeden kunnen worden, indien er minder afval verwerkt moest worden, waardoor men meer tijd in onderzoek voor een veiligere berging kon investeren (Van Horenbeek, 2013).

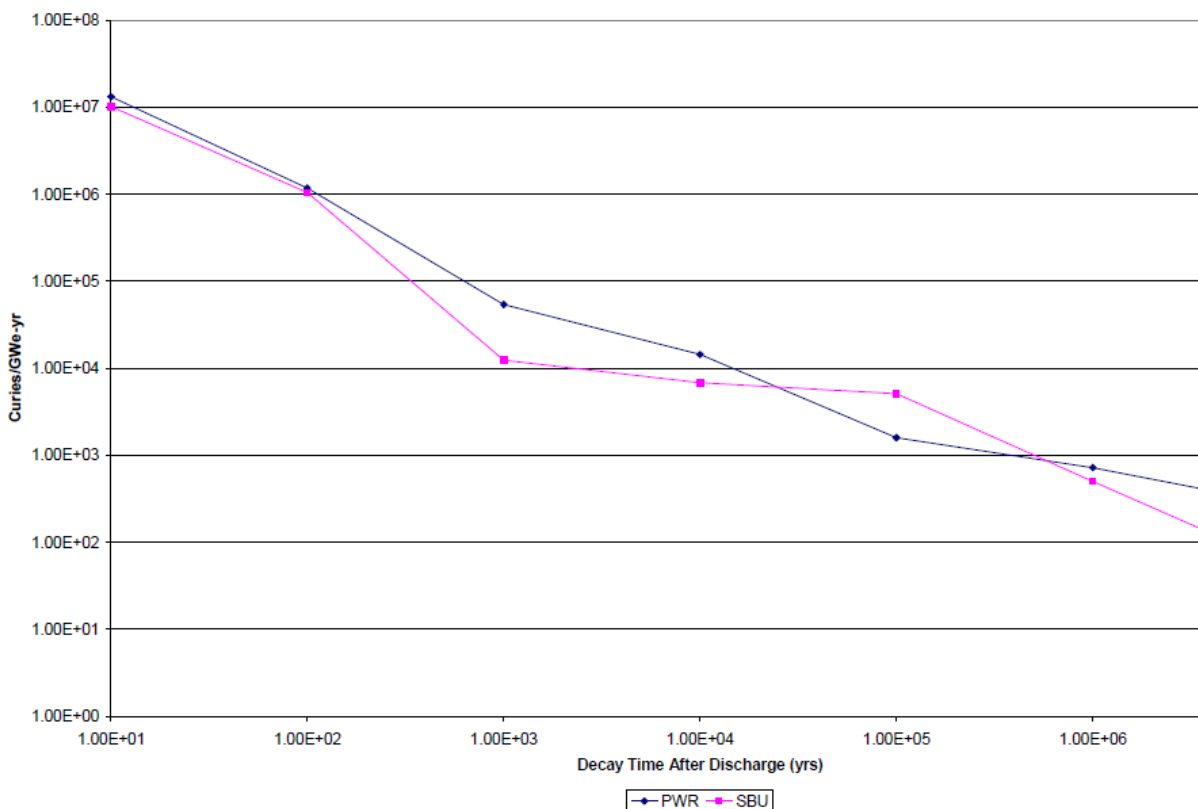
*Lightbridge Corporation* haalt ook aan dat deze reductie van 40% een stap in de goede richting is voor het beperken van de totale opslag van nucleair afval. Het zal volgens hen vooral de opkomende nucleaire landen voorruit helpen. Sommigen onder hen beschikken niet over de middelen om het radioactief afval op te slaan. Ze stellen dan contracten op met landen die wel over deze middelen beschikken. Deze contracten zullen dan goedkoper zijn wegens de reductie in het afval (Lightbridge Corporation, 2010).

Het bedrijf claimt ook dat de ontladen brandstof veel minder stralingswarmte afgeeft. Zo zal er in het begin tot en met 22% minder hitte afgegeven worden dan bij ontladen brandstof van de uranium dioxide cyclus. Na drie jaar zal dit percentage oplopen tot 35% en na 100 jaar zal er een reductie zijn van 50%. Dit maakt dat het afval sneller behandeld kan worden en er minder geïnvesteerd zal moeten worden in koelinstallaties (Lightbridge Corporation, 2009).

## 5.4.2 Straling van de verbruikte brandstof

Na verloop van tijd is de brandstof in de reactor opgebruikt en worden de assemblies eruit gehaald. Ze zijn zeer warm en radioactief, daarom slaagt de kerncentrale deze meestal op in een splijtstofdok voor 6 a 10 jaar. Zo kan de hitte die gegenereerd wordt door de radioactiviteit geleidelijk aan afnemen. Wanneer de assemblies voldoende zijn afgekoeld moeten ze verwerkt worden want ze zijn nog altijd zeer radioactief. De radioactiviteit van de assemblies kan opgedeeld worden in 2 groepen, zo heeft men de kortlevende (< 300 jaar) en de langlevende (> 500 jaar) isotopen. De onderverdeling is gebaseerd op de halfwaardetijden van deze isotopen. Het grootste deel van de verbruikte brandstof bestaat uit de kortlevende isotopen, eens deze zijn uitgestraald zullen de langlevende overblijven. Deze groep bestaat uit elementen als plutonium, neptunium, americium en andere. Ze blijven radioactief ( $\alpha$ -, $\beta$ -,  $\gamma$ -straling) voor enkele duizenden jaren wegens hun zeer lange halfwaardetijden en worden voortgebracht door U-238. Dit uranium is de hoofdcomponent van de conventionele uranium dioxide brandstof. Aangezien de *Radkowsky Thorium Fuel* uit veel minder U-238 is opgebouwd, zal er ook een kleinere portie van deze langlevende elementen in de verbruikte brandstof zitten (Lightbridge Corporation, 2010).

Grafiek 1: Straling RTF en uranium



(Brookhaven National Laboratory, 2004)

Nu dient er opgemerkt te worden dat het bovengenoemde U-238, dat verantwoordelijk is voor de langlevende elementen in de verbruikte uranium dioxide brandstof wordt vervangen door thorium in de *Radkowsky Thorium Fuel*. Thorium genereert ook langlevende isotopen zoals Pa-231, Th-229 en Th-230. De straling ( $\alpha$ ,  $\beta$  en  $\gamma$ ) van deze elementen bestaat voornamelijk uit alfastraling. Deze straling gaat maar enkele centimeters ver in de lucht en kan tegengehouden worden door de menselijke huid of een blad papier. De straling van Pa-231, Th-229 en Th-230 bestaat ook deels uit gammastraling, deze is echter veel gevaarlijker. Zij wordt niet zo makkelijk tegen gehouden en gaat zelfs door zeer dikke materialen. Dit brengt met zich mee dat beide afvalproducten aan elkaar gewaagd zijn op het vlak van straling. Figuur 2 illustreert dit. Op de figuur staat PWR voor de uitgezonden straling ( $\alpha$ ,  $\beta$  en  $\gamma$ ) van de conventionele uranium dioxide brandstof en SBU voor de straling van *Radkowsky Thorium Fuel* (Environmental Protection Agency, 2014); (Australian Nuclear Science and Technology Organisation, 2009).

# Besluit

Na onderzoek blijkt dat de *Radkowsky Thorium Fuel* een vervanger met talrijke voordelen kan zijn voor de uranium brandstof die momenteel gebruikt wordt in de *Pressurized Water Reactors*. Het woord 'kan' dient hier benadrukt te worden aangezien de front en back end van de nucleaire industrie in handen zijn van enkele grote bedrijven. Enkel indien zij de stap willen zetten om de pionierskosten te dragen die gepaard gaan bij het opzetten van een totaal nieuwe productielijn die thorium brandstofstaven fabriceert kan RTF geïntroduceerd worden.

De voordelen van *Radkowsky Thorium Fuel* zijn:

- De ontginning van thorium is minder schadelijk dan die van uranium.
- Er zijn amper nog ontwikkelingskosten nodig om de brandstof te commercialiseren.
- De huidige reactors (PWR's) dienen slechts een kleine modificatie te ondergaan ter implementatie van de RTF.
- De afvalstoffen afkomstig van RTF bevatten tot drie keer minder plutonium dan die van de huidige reactoren.
- Uit de afvalstoffen van RTF kunnen minder makkelijk kernwapens gefabriceerd worden dan uit die van uranium dioxide brandstof.
- De RTF produceert tot 40% minder nucleair afval dan uranium dioxide brandstof.
- Het afval van RTF koelt sneller af, waardoor minder geïnvesteerd dient te worden in koelinstallaties.
- RTF is volgens de berekeningen veel goedkoper dan de uranium dioxide brandstof. De gemiddelde kostprijs van RTF zal zeker 10% lager liggen.

De obstakels die de *Radkowsky Thorium Fuel* dient te overwinnen zijn de volgende:

- Thorium wordt weinig of niet ontgonnen.
- Momenteel heeft geen enkel bedrijf van de brandstofproducerende oligopolie de pionierskosten op zich genomen om de RTF te produceren..
- Voor het gebruik van RTF dient een kerncentrale de hefkraan waarmee het de assemblies plaatst aan te passen.
- De brandstofconfiguratie is vrijwel onbekend.

Om terug te komen op de vooropgestelde doelstellingen, blijkt dat het merendeel van deze werden bereikt. Deze thesis is een wetenschappelijk doch vlot lezend en vooral informierend werk. De gehele brandstofcyclus wordt toegelicht om de lezer een beeld te verschaffen over het gehele proces. Ook blijkt uit bovenstaande opsomming dat de *Radkowsky Thorium Fuel* de perfecte kandidaat is ter vervanging van de uranium dioxide brandstof. Hieronder worden de voordelen op economisch, ecologisch en op het vlak van non-proliferatie kort toegelicht.

In de kostenanalyse wordt vastgesteld dat de RTF veel goedkoper is dan de conventionele uranium dioxide brandstof. De RTF is zo goedkoop wegens de kostenreductie in de back end. Aangezien de brandstof 40% minder nucleair afval produceert dan de conventionele brandstof is de reductie in kosten een logisch gevolg.

Deze reductie van 40% in nucleair afval brengt ons bij het volgende onderdeel, namelijk het ecologische aspect. Door deze vermindering in nucleair afval wordt de kans dat het afval in het milieu vrijkomt aanzienlijk kleiner. Want er dienen minder nucleaire transporten plaats te vinden en er dient relatief minder nucleair afval beheerd te worden. Daarbij komt dat ook de ontginning van thorium minder schadelijk is voor de gezondheid van de mijnwerkers. Dit is te wijten aan het gas dat vrijkomt tijdens het proces. Het gas dat bij de ontginning van thorium vrijkomt, namelijk radon-220, heeft een veel kleinere halfwaardetijd dan het radon-222 dat bij de ontginning van uranium vrijkomt. Daarenboven wordt bij de ontginning van thorium tweemaal minder radioactief afval geproduceerd dan bij die van uranium. Ook wordt in sommige gevallen bij de ontginning van uranium het grondwater aangetast. Op het vlak van ecologie scoort de RTF dus veel beter dan de conventionele uranium dioxide brandstof.

De *Radkowsky Thorium Fuel* biedt ook meer weerstand tegen proliferatie, want de verbruikte brandstof bevat drie keer minder plutonium dan de conventionele brandstof. Ook verlenen de afvalstoffen die geproduceerd worden door RTF zich veel minder tot het vervaardigen van kernwapens.

Één van de grootste voordelen van deze brandstof is dat de kerncentrales slechts een kleine modificatie dienen te ondergaan. Enkel de hefkrana die de brandstof assemblies plaatst dient aangepast te worden. De rest van de soft- en hardware kan nagenoeg hetzelfde blijven.

Ondanks al deze voordelen dienen er toch enkele barrières doorbroken te worden. Deze worden besproken in de aanbevelingen.

## Aanbevelingen

Deze thesis heeft vooral een informierend doel waardoor het geïnteresseerde personen en instanties wil en kan aanzetten tot dieper onderzoek en ontwikkeling voor het gebruik van thorium in de energiesector. Zo kan er bijvoorbeeld een ecologische onderzoek ondernomen worden over een raffinaderij die thorium verwerkt. Er is nog nooit zo'n studie aangevat dus zal de informatie die verkregen wordt van enorme waarde zijn.

De resultaten van deze thesis zijn zondermeer significant, daarom zou de overheid en/of de Europese Unie zich moeten verdiepen in dit onderwerp. Zij zouden, de bedrijven die de front end van de nucleaire cyclus verzorgen, kunnen aanzetten tot het investeren in nieuwe productielijnen. De technologie van de RTF staat praktisch op punt, enkel de oligopolie die over de front end gaat dient aangezet te worden om de pionierskosten te dragen die gepaard gaan bij het opzetten van een nieuwe productielijn die thorium brandstofstaven produceert. De overheid en vooral de inwoners van het desbetreffende land hebben hier baat bij aangezien door gebruik van RTF de energieprijzen zou kunnen zakken. Tevens is deze brandstof minder vervuilend dan de huidige. Toch zou het niet slecht zijn een *Life Cycle Assessment* (LCA) te maken over de RTF-cyclus en deze te vergelijken met de LCA van de huidige brandstof.

De nucleaire industrie, vooral dan de uitbaters van de kerncentrales, hebben er alle baat bij deze brandstofconfiguratie te implementeren in de huidige reactoren. Want de kostprijs om energie op te wekken is veel goedkoper dan bij het gebruik van uranium. Het probleem dat zich echter stelt voor hen is dat ze afhankelijk zijn van de brandstofproducerende oligopolie. Indien deze geen thorium brandstofstaven produceren zijn ze genoodzaakt uranium te blijven gebruiken.

Een laatste aanbeveling is gericht tot de wetenschappelijke wereld. In plaats van technologieën te ontwikkelen om uranium te extraheren uit het zeewater, zou hun knowhow beter van pas komen bij het ontwikkelen en commercialiseren van thoriumreactoren zoals de *Molten Salt Reactor*, de *Pressurized Heavy Water Reactor* of de *High-Temperature Gas-Cooled reactor*. Deze reactoren beschikken over nog veel betere eigenschappen dan de *Radkowsky Thorium Fuel*. Zo kan er bij een MSR zich theoretisch gezien geen meltdown meer voordoen. Deze reactoren dienen natuurlijk voldoende getest, onderzocht en geoptimaliseerd te worden vooraleer ze gecommmercialiseerd kunnen worden.

*Radkowsky Thorium Fuel* kan het begin van een nieuw nucleair tijdperk betekenen, mits één of meer van volgende instanties de brandstofconfiguratie steunen: de overheid, de nucleaire industrie of de wetenschappelijke wereld. Zij hebben de toekomst van de nucleaire energie-industrie in handen...

# Bibliografie

Archive, A. Gun-type Bomb. *Nuclear Fission*. Atomic Archive.

Areva. (2008). *Do we have to think again at the thorium cycle?* Brussel: Areva.

Areva. (2013). *Conversion*. Retrieved November 22, 2013, from Areva:  
<http://www.areva.com/EN/operations-757/conversion-the-fluorination-of-uranium-in-2-stages.html>

Areva. (2013). *Enrichment*. Retrieved November 24, 2013, from Areva:  
<http://www.areva.com/EN/operations-787/enrichment-increasing-the-proportion-of-uranium235.html>

Areva. (2013). *Operation: extracting uranium ore*. Retrieved November 20, 2013, from Areva: <http://www.areva.com/EN/operations-619/operation-extracting-uranium-ore.html>

Areva. (2013). *Prospection: Identifying new uranium deposits - Areva*. Retrieved November 20, 2013, from Areva: <http://www.areva.com/EN/operations-666/prospection-identifying-new-uranium-deposits.html>

Areva. (2013). *Uranium processing*. Retrieved November 22, 2013, from Areva:  
<http://www.areva.com/EN/operations-677/uranium-processing-from-ore-to-yellow-cake.html>

Areva/EDF. *Pressurized Water Reactor*. Areva/EDF.

Australian Nuclear Science and Technology Organisation. (2009). *The Thorium Fuel Cycle*. Australian Nuclear Science and Technology Organisation.

Bel V. (2008). *Bel V - Werking van een PWR*. Retrieved from Bel V:  
[http://www.belv.be/index.php?option=com\\_content&task=view&id=31&Itemid=58](http://www.belv.be/index.php?option=com_content&task=view&id=31&Itemid=58)

Britannica. (2014, April 19). *Thorium Processing*. Retrieved November 28, 2013, from Britannica: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/593298/thorium-processing>

Britannica. (2014, April 19). *Thorium Processing - Britannica Online Encyclopedia*. Retrieved November 21, 2013, from Britannica:  
<http://www.britannica.com/EBchecked/topic/593298/thorium-processing>

Brookhaven National Laboratory. (2004). *Optimization of heterogeneous utilization of thorium in PWRs to enhance proliferation resistance and reduce waste*. New York: Brookhaven National Laboratory.

- Busse, M. (2000). *OPTIMIZATION OF THORIUM-BASED SEED-BLANKET FUEL CYCLES FOR NUCLEAR POWER PLANTS*. Massachusetts Institute of Technology.
- Chang, K. (2002, Maart 5). *Alvin Radkowsky, 86, Developer Of a Safer Nuclear Reactor Fuel*. Retrieved Oktober 18, 2013, from The New York Times: <http://www.nytimes.com/2002/03/05/world/alvin-radkowsky-86-developer-of-a-safer-nuclear-reactor-fuel.html>
- Corporation, L. (2014, April 17). *Lightbridge - History*. Retrieved Oktober 28, 2013, from Lightbridge Corporation: <http://www.ltbridge.com/leadership/history>
- CREG. (2010). *Het nucleair akkoord in Duitsland en de toepassing ervan op België*. CREG.
- Dilorio, C. L., Knight, D. J., & Mancuso, M. P. (2012). *Adoption of Thorium Power*. Worcester Polytechnic Institute.
- Dollarkoers. (2014, April 27). *Historie van de EUR/USD dollarkoers in mei 2005*. Retrieved from Dollarkoers: <http://www.dollarkoers.nl/historie/2005/>
- Du Toit, M. H. (2013). *Introducing advanced thorium-based fuel cycles in SA : an evolutionary approach*. North-West University.
- Elkhadrawi, A. (2008). *Thorium Based Nuclear Reactors*. University of Surrey.
- Environmental Protection Agency. (2014, Februari 28). *Thorium | Radiation Protection | US EPA*. Retrieved Oktober 14, 2013, from Environmental Protection Agency: <http://www.epa.gov/radiation/radionuclides/thorium.htm>
- Exchange Rates. (2014, Mei 10). *US Dollar to Euro*. Retrieved Februari 19, 2014, from Exchange Rates: <http://www.exchangerates.org.uk/>
- FANC. (2013). *De belangrijkste dosislimieten*. Retrieved Februari 17, 2014, from FANC: <http://www.fanc.fgov.be/nl/page/de-belangrijkste-dosislimieten/1184.aspx>
- Holly, E. (2013, Augustus 28). *Thorium waiting in the wings*. Retrieved Oktober 16, 2013, from Institution of Mechanical Engineers: <http://www.imeche.org/news/engineering/thorium-waiting-in-the-wings>
- HowStuffWorks. (2014, Maart 12). *Howstuffworks "How nuclear bombs work"*. Retrieved from HowStuffWorks: <http://science.howstuffworks.com/nuclear-bomb1.htm>
- Hyperphysics. Implosion Detonation. *Nuclear Weapons*. Hyperphysics.
- Hyperphysics. Implosion Type. *Nuclear Weapons*. Hyperphysics.
- International Atomic Energy Agency. (2005). *Thorium fuel cycle — Potential benefits and challenges*. Vienna: International Atomic Energy Agency.



- International Atomic Energy Agency. (2014). *PRIS - Country Statistics*. Retrieved Januari 15, 2014, from International Atomic Energy Agency:  
<http://www.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=BE>
- Johnnydepp-zone. Bomb Soup. *Bomb Soup*. Johnnydepp-zone.
- Lightbridge Corporation. (2009). *Thorium-based Seed and Blanket Fuel*. Retrieved Februari 20, 2014, from Lightbridge Corporation:  
<http://www.ltbridge.com/fueltechnology/thoriumbasedseedandblanketfuel>
- Lightbridge Corporation. (2010). *On the practical use of Lightbridge thorium-based fuels for nuclear power generation*. Lightbridge Corporation.
- Look for chemicals. (2014, Mei 8). *Conversion of uranium*. Retrieved from Look for chemicals:  
<http://www.lookchem.com/Chempedia/Chemical-Technology/Inorganic-Chemical-Technology/3047.html>
- Malone, J. (2014, Januari 17). Radkowsky Thorium Fuel. (S. D. Belder, Interviewer)
- Martin, R. (2012). *SuperFuel: Thorium, the Green Energy Source for the Future*. New York: Palgrave Macmillan.
- Mitsui Petrochemical Industries, Ltd. (2013, Mei 9). *Reactor for preparing uranium trioxide*. Retrieved from Google Patents: <http://www.google.com/patents/US4399106>
- Nationale Bank van België. (2011). *De Belgische nucleaire schaarsterente*. Nationale Bank van België.
- Negev, B.-G. U. (2005, December 18). *The Engineering Faculty - Nuclear Energy - RTF*. Retrieved Oktober 20, 2013, from Ben-Gurion University of the Negev :  
<http://web.bgu.ac.il/Eng/engn/nuclear/research/NucEnergy/RTF.htm>
- News, W. (2002, Februari 22). *World News*. Retrieved Oktober 17, 2013, from Alvin Radkowsky - World News:  
[http://article.wn.com/view/2002/02/22/Alvin\\_Radkowsky/#/wiki0](http://article.wn.com/view/2002/02/22/Alvin_Radkowsky/#/wiki0)
- NIRAS. (2014, Mei 10). *Ontsmetting en recyclage*. Retrieved from NIRAS:  
<http://www.niras.be/content/ontsmetting-en-recyclage>
- Raitses, G., Galperin, A., & Todosow, M. (2012). *Non-Proliferative, Thorium-Based, Core and Fuel Cycle for Pressurized Water Reactors*. Upton, New York: Brookhaven National Laboratory.
- Rate Inflation. (2014, Mei 9). *Euro area historical CPI*. Retrieved from Rate Inflation:  
<http://www.rateinflation.com/consumer-price-index/euro-area-historical-cpi>

- Schaffer, M. B. (2013). Abundant thorium as an alternative nuclear fuel: Important waste disposal and weapon proliferation advantages. *Energy Policy*, 4-12.
- Schopflin, V. A. (2011). *The use of Thorium Uranium Dioxide in Current Pressurized Water Reactors*. Hartford: Rensselaer Polytechnic Institute.
- Serfontein, D. E., & Mulder, E. J. (2013). *Thorium-based fuel cycles: Reassessment of fuel economics and proliferation risk*. Potchefstroom: North-West University.
- The Federal Reserve Bank of Minneapolis. (2014, Mei 10). *What is a dollar worth?* Retrieved from The Federal Reserve Bank of Minneapolis:  
[http://www.minneapolisfed.org/community\\_education/teacher/calc/](http://www.minneapolisfed.org/community_education/teacher/calc/)
- The-Periled-Sea. Fukushima And Its Mafia Run Crew Get Real About Fuel Rod Removal. *Fuel Rod assembly*. The Periled Sea.
- Thompson, L. (2010, November 28). *Vitrification of Nuclear Waste*. Retrieved Februari 12, 2014, from Standford: <http://large.stanford.edu/courses/2010/ph240/thompson2/>
- Thorium. (2011). *Thorium and Environment*. Retrieved Oktober 15, 2013, from Thorium:  
[http://www.thorium.tv/en/thorium\\_environment.php](http://www.thorium.tv/en/thorium_environment.php)
- U.S. News. (2014, Mei 21). *Should nuclear power be expanded*. Retrieved from U.S. News:  
<http://www.usnews.com/debate-club/should-nuclear-power-be-expanded>
- Ueda, K. Fluidized Bed Reactor. *Reactor for preparing uranium trioxide*. MITSUI PETROCHEMICAL INDUSTRIES, LTD., Kasumi, Japan.
- Uranium One. (2014, Mei 8). *What is ISL mining?* Retrieved from Uranium One:  
<http://www.uranium1.com/index.php/en/mining-operations/what-is-isl-mining>
- Van Horenbeek, J. (2013, September 20). Radioactief afval druppelt uit vijf vaten bij Belgoproces in Dessel. *De Morgen*.
- Voncken, J. (2010). Zeldzame Aardelementen. *Kennislink*.
- Westinghouse Electric Corporation. (1984). *The Westinghouse pressurized water reactor nuclear power plant*. Westinghouse Electric Corporation.
- Wikipedia. (2014, Mei 10). *Ion-exchange resin*. Retrieved from Wikipedia:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Ion-exchange\\_resin](http://en.wikipedia.org/wiki/Ion-exchange_resin)
- Wikipedia. (2014, Mei 10). *Radioactive Waste*. Retrieved from Wikipedia:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Radioactive\\_waste](http://en.wikipedia.org/wiki/Radioactive_waste)

- World Nuclear Association. (2014). *Conversion*. Retrieved November 22, 2013, from World Nuclear Association: <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Conversion-Enrichment-and-Fabrication/Conversion-and-Deconversion/>
- World Nuclear Association. (2012). *Radioactivity in some natural and other materials*. Retrieved Januari 25, 2013, from Radiation and life: <http://www.world-nuclear.org/info/Safety-and-Security/Radiation-and-Health/Radiation-and-Life/>
- World Nuclear Association. (2014). *Nuclear Fuel Fabrication*. Retrieved November 23, 2013, from World Nuclear Association: <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Conversion-Enrichment-and-Fabrication/Fuel-Fabrication/>
- World Nuclear Association. (2014). *Nuclear Power Economics*. Retrieved Januari 15, 2014, from World Nuclear Association: <http://www.world-nuclear.org/info/Economic-Aspects/Economics-of-Nuclear-Power/>
- World Nuclear Association. (2014). *Radioactive Waste Management*. Retrieved Januari 25, 2014, from World Nuclear Association: <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Nuclear-Wastes/Radioactive-Waste-Management/>
- World Nuclear Association. (2014). *Thorium*. Retrieved Januari 25, 2013, from World Nuclear Association: <http://www.world-nuclear.org/info/current-and-future-generation/thorium/>

# Bijlage:

## Bijlage 1: Borehole mining of In Situ Leaching (ISL)

Conventional mining involves extracting ore from the ground and processing it to extract the minerals being sought. ISR (in situ recovery, also known as in situ leaching (“ISL”) or solution mining) involves using liquids (commonly referred to as “leaching liquors” or “lixivants”) which are pumped through the orebody while it is in the ground to recover the minerals out of the ore by leaching. Consequently there is little surface disturbance and no tailings or waste rock are generated. However, the orebody needs to be permeable to the liquids used, and located so that the liquids do not contaminate groundwater away from the orebody (Uranium One, 2014).

ISL mining technology was developed independently in both the U.S.S.R. and the U.S.A. in the mid 1970's. The method was conceived for extracting uranium from typical roll-front type deposits (a sub-type of sandstone uranium deposits) located in water-saturated permeable rocks that were not suitable for economical conventional mining techniques. It was developed in both countries using similar approaches in engineering and technology. However, the acid leach system was adopted in the U.S.S.R., while an alkaline, primarily carbonate-based system was adopted in the U.S.A. The specific approach is determined by deposit geology and groundwater conditions. If there is significant calcium in the ore zone, alkaline (carbonate-based) leaching must be used. While uranium production in Kazakhstan and Australia uses acid leaching agents, ISL mines in the U.S.A. normally use alkaline leaching agents such as a combination of sodium bicarbonate and carbon dioxide. At the Honeymoon Project in South Australia, the process involves acid leaching with weak sulfuric acid supplemented by sodium perchlorate. The leach solution is at a pH of approximately 2.0, about the same pH as vinegar. The concentration of acid used in Kazakhstan is higher, but the pH achieved is the same as in Australia (Uranium One, 2014).

The following diagram illustrates a typical ISL mining operation based on the methods used on the Uranium One's material properties in Kazakhstan (Uranium One, 2014).

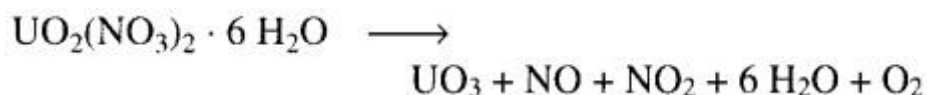
## **ISL Wellfield**

An ISL mine consists of wellfields that are progressively established over the orebody as uranium is depleted from sections of the orebody after leaching. The wellfield consists of injection wells, which are used to inject the uranium leaching liquors (either acid or alkaline) into the orebody, and production wells which pump the “pregnant”, or uranium-bearing, solution to the surface. Typically there are several injection wells to every production well. Wellfield patterns are typically configured as hexagons (with six injection wells surrounding each production well), or as parallel linear rows. The spacing between injection and production wells in a hexagon pattern typically ranges from 30 to 50 metres. A series of monitor wells are situated around each mineralized zone to detect any movement of mining fluids outside the mining area. The wells are cased to ensure that the leaching liquors only flow to and from the ore zone and do not affect any overlying aquifers (Uranium One, 2014).

## Bijlage 2: natte en droge methode

### Wet Process for Uranium(VI) Fluoride Manufacture

In the production of uranium(IV) oxide in the wet process, the uranium concentrate is first converted into a uranyl nitrate solution with nitric acid. After the purification of the uranyl nitrate by solvent extraction, it can be converted into uranium(IV) oxide by two different routes: either by thermal denitration to uranium(VI) oxide which is then reduced to uranium(IV) oxide or by conversion of uranyl nitrate into ammonium diuranate which is reduced to uranium(IV) oxide. Purification proceeds by extraction of the uranyl nitrate hydrate from the acidic solution with tri-n-butylphosphate in kerosene and stripping this organic phase with water, whereupon uranium goes into the aqueous phase. This diluted aqueous uranyl nitrate solution is evaporated to uranyl nitrate hexahydrate,  $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , which is then calcined to uranium(VI) oxide in a fluidized bed furnace:



The temperature must not exceed  $400^\circ\text{C}$ , to prevent the formation of  $\text{U}_3\text{O}_8$ . The nitrous gases produced are processed to nitric acid, which is recycled. The subsequent reduction of uranium(VI) oxide to uranium(IV) oxide with hydrogen at  $500^\circ\text{C}$  also proceeds in the fluidized bed furnace. The second route to uranium(IV) oxide consists of precipitation of ammonium diuranate from the solvent extraction-purified aqueous uranyl nitrate solution by adding ammonia and then reducing it with hydrogen to uranium(IV) oxide (Comurhex process developed in France). Uranium(IV) oxide is the starting material for uranium(IV) fluoride production in which uranium(IV) oxide is generally reacted with anhydrous hydrogen fluoride. This difficult to carry out exothermic reaction proceeds either in a fluidized bed, in moving bed reactors, or in screw-reactors. To achieve as complete as possible reaction in fluidized bed reactors, two fluidized bed reactors are connected in series. Screw-reactors are also preferably connected in series. In moving bed reactors the reduction zone and the hydrofluorination are arranged above one another in a plant. The uranium(IV) oxide produced by the reduction of uranium(VI) oxide with hydrogen is very reactive and is completely reacted with HF at temperatures between  $500$  and  $650^\circ\text{C}$  to uranium(IV) fluoride. A wet process is also utilized for the production of uranium(IV) fluoride, namely the EXCER process (Ion Exchange Conversion Electrolytic Reduction). In this process the ion exchange- or extraction-purified uranium(VI) solution is either electrolytically or chemically reduced to uranium(IV), which is precipitated with hydrofluoric acid as uranium(IV) fluoride hydrate ( $\text{UF}_4 \cdot 0.75\text{H}_2\text{O}$ ). This is subsequently dehydrated at  $400$  to  $450^\circ\text{C}$ . The conversion of uranium(IV) fluoride to uranium(VI) fluoride proceeds exclusively with elemental fluorine, either in flame-reactors or in fluidized bed reactors. The

uranium(VI) fluoride formed is recovered from the reaction gases by freezing it out. The wet process for uranium(VI) fluoride manufacture is utilized in the Kerr-McGee process, in which the reduction proceeds with a  $H_2/N_2$ -mixture from ammonia cracking and hydrofluorination is carried out in a two stage fluidized bed. British Nuclear Fuel Ltd and Eldorado Nuclear Ltd/Canada also use wet processes (Look for chemicals, 2014).

### **Dry Process for Uranium(VI) Fluoride Manufacture**

In the dry process, introduced by Allied Chemical Corp., the uranium concentrate is pelletized and directly reduced with hydrogen to uranium(IV) oxide at temperatures between 540 and 650°C in a fluidized bed reactor. Hydrofluorination to uranium(IV) fluoride proceeds in two fluidized bed reactors connected in series. After fluorinating the uranium(IV) fluoride formed in a production unit consisting of a flame-reactor and a fluidized bed reactor, the uranium(VI) fluoride produced is purified in a two stage pressure distillation process. This distillative purification process is necessary, because, in contrast with the wet process, no purification is carried out in earlier stages. The uranium conversion capacity in Western industrialized countries in 199.5 was nominally  $385 \cdot 10^3$  t/a  $UF_6$ , of which about 73% is accounted for by wet processes. The capacity in the former States of the USSR is estimated to be ca.  $14 \cdot 10^3$  t/a  $UF_6$ . In 199.5 the total conversion was  $51.3 \cdot 10^3$  t  $UF_6$  (Look for chemicals, 2014).

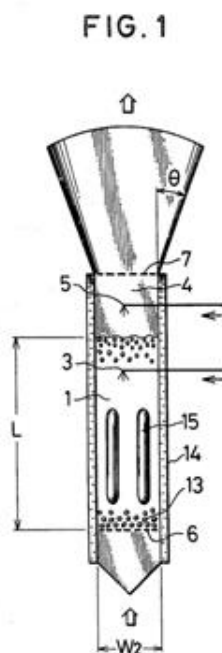
## Bijlage 3: Wervelbedreactor

The present invention relates to a improved fluidized-bed reactor for preparing uranium trioxide. The reactor can be operated easily and uranium trioxide can be prepared efficiently (Mitsui Petrochemical Industries, Ltd., 2013).

An aqueous solution of uranyl nitrate is fed into the fluidized-bed reactor, heated, and decomposed. Uranium trioxide powder is prepared by a denitration reaction and is removed from said reactor. The fluidized-bed reactor has (a) a rectangularly (including squarely) shaped bed which satisfies the critical safety shape of  $^{235}\text{U}$ , (b) plural holes to supply an aqueous solution of uranyl nitrate into said fluidized-bed, (c) at least two reaction rooms divided by a moveable barrier or barriers, the bottoms of which can be moved to control their distance from the floor of the fluidized-bed, and a mechanism with which uranium trioxide powder is removed by mainly being overflowed from the top of said barrier through at least two reaction rooms, (d) a heating means inside and outside of said fluidized-bed, and (e) a head structure which is upwardly V-shaped (Mitsui Petrochemical Industries, Ltd., 2013).

The reactor of the present invention is a superior, improved fluidized-bed reactor for preparing uranium trioxide from an aqueous solution of uranyl nitrate which has good fluidity, substantial uniformity of heat, high safety, good continuous operation, high through-puts, and high efficiency. The reactor's interior can be cleaned easily. Manufacture of the reactor is comparatively easy (Mitsui Petrochemical Industries, Ltd., 2013).

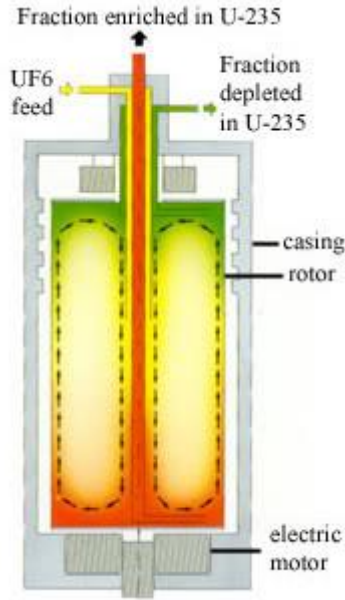
U.S. Patent Aug. 16, 1983 Sheet 1 of 2 4,399,106



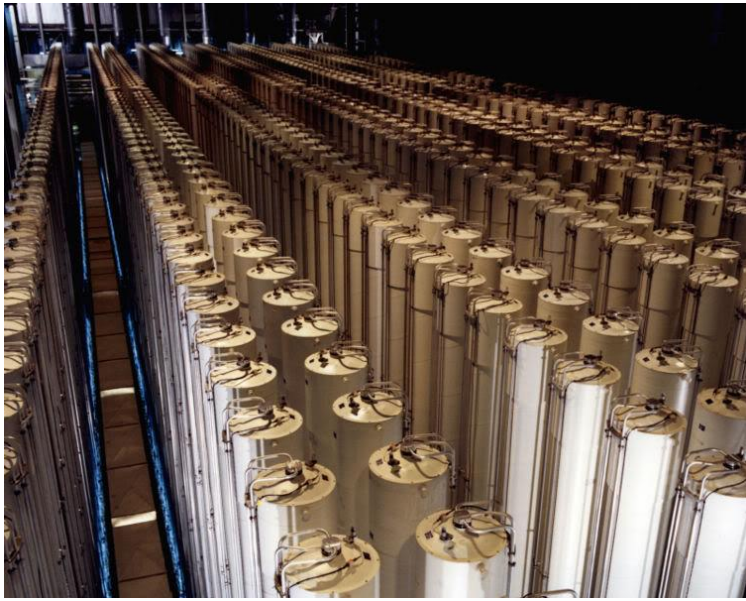
(Ueda)



# Bijlage 4: Gasultracentrifuge

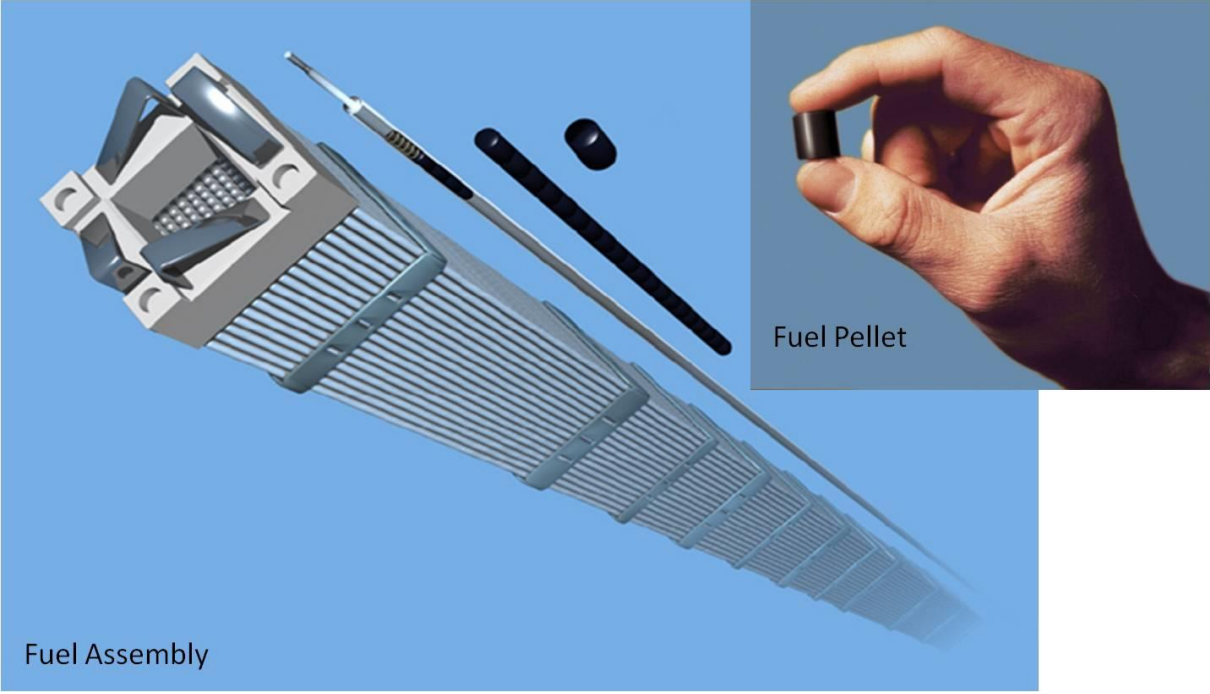


(Johnnydepp-zone)



(Johnnydepp-zone)

# Bijlage 5: van pellet tot fuel rod assembly



(The-Periled-Sea)

## Bijlage 6: Zeldzame aarden

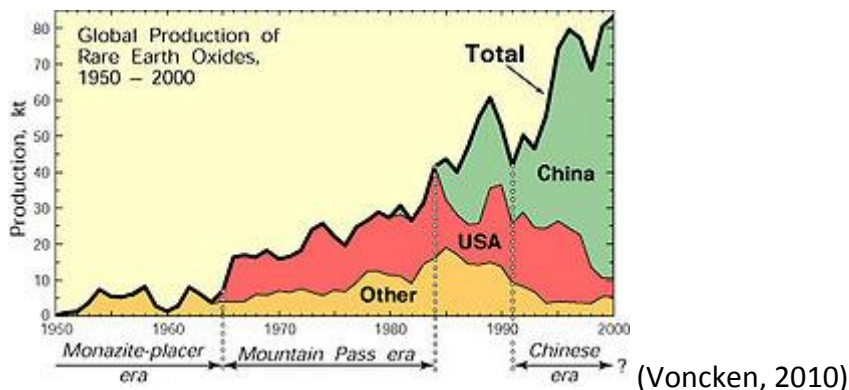
### Zeldzame Aardelementen

De Zeldzame Aardelementen is een groep van elementen, grotendeels bestaande uit de zogenaamde Lanthaniden in het Periodiek Systeem. In dit artikel wordt ingegaan op de belangrijkste voorkomens van deze elementen, de belangrijkste ertsmineralen hiervoor, de belangrijkste afzettingen, en de (hightech) toepassingen van deze elementen (Voncken, 2010).

door Jack Voncken

De Zeldzame Aardelementen, ook wel genoemd Zeldzame Aarden, of Zeldzame Aardmetalen worden in het Engels Rare Earth Elements (REE) genoemd. De REE hebben zeer veel (hightech) toepassingen en ze zijn dus uiterst waardevol. De Zeldzame Aardelementen komen niet vrij als metaal voor in de natuur, en oxideren heel gemakkelijk in de lucht. Als men het over de Zeldzame Aardelementen (REE) heeft, praat men dan ook meestal over de oxidevorm (ook wel weergegeven als REO of Rare Earth Oxide) (Voncken, 2010).

China produceert 93 procent (!) van deze grondstoffen en heeft dus een bijna-monopolie. Momenteel overweegt China zelfs om de productie volledig voor zichzelf te houden. Al vele decennia produceerde de VS ook een groot deel van de REE. Hoewel men daar nu een nieuwe afzetting gaat ontginnen, is de Amerikaanse bijdrage sinds eind jaren '90 sterk afgenomen. Productie van REE in andere landen is bescheiden (Figuur 1) (Voncken, 2010).



Figuur 1. Wereldproductie van REE (als oxide) (1 kt=10<sup>6</sup> kg) van 1950 tot 2000. USGS Factsheet 087-02

## De Lanthanide-groep

De Zeldzame Aardelementen zijn in hoofdzaak de elementen uit de zogenaamde Lanthanide-groep in het periodiek systeem (Figuur 2). Dat is dus de elementenserie La – Lu, (element 57 – 71). De elementen scandium (Sc), en in het bijzonder yttrium (Y), worden gewoonlijk ook tot de Zeldzame Aarden gerekend (Voncken, 2010).

De Zeldzame Aarden zijn als groep erg waardevol, maar de waarde van de afzonderlijke REE loopt sterk uiteen: een van de goedkoopste REE, cerium (Ce), kost als oxide tussen de 3,5 en 4 US\$/Kg. De kosten van europium (Eu) en lutetium (Lu) als oxide liggen tussen de 500 en 550 US\$/Kg. Ter vergelijking: de prijs van ruwijzer ligt ergens tussen de 0,2 en 0,5 US\$/Kg (Voncken, 2010).

Legend:

- Alkalimetalen
- Aardalkalimetalen
- Overgangsmetalen
- Andere metalen
- Niet-metalen
- Edelgasen

Callout for Silicon (Si):

- Atoom-getal: 14
- Atoom-gewicht: 28,09
- Symbol: Si
- Naam: Silicium
- Zwart vast (113)
- Blauw vloeistof
- Rood gas
- ontdekt

1 1,008 H Waterstof	2 4,003 He Helium																
3 6,94 Li Lithium	4 9,01 Be Beryllium											5 10,81 B Bor	6 12,01 C Koolstof	7 14,01 N Stikstof	8 16,00 O Zuurstof	9 19,00 F Fluur	10 20,18 Ne Neon
11 22,99 Na Natrium	12 24,31 Mg Magnesium											13 26,98 Al Aluminium	14 28,09 Si Silicium	15 30,97 P Fosfor	16 32,06 S Zwavel	17 35,45 Cl Chloor	18 39,95 Ar Argon
19 39,10 K Kalium	20 40,08 Ca Calcium	21 44,96 Sc Scandium	22 47,88 Ti Titaan	23 50,94 V Vanadium	24 52,01 Cr Chroom	25 54,94 Mn Mangaan	26 55,85 Fe Izer	27 58,93 Co Kobalt	28 58,71 Ni Nikkel	29 63,54 Cu Koper	30 65,37 Zn Zink	31 69,72 Ga Gallium	32 72,64 Ge Germanium	33 74,92 As Arsen	34 78,96 Se Selen	35 79,90 Br Brom	36 83,80 Kr Krypton
37 85,47 Rb Rubidium	38 87,62 Sr Strontium	39 88,91 Y Yttrium	40 91,22 Zr Zirkonium	41 92,91 Nb Niobium	42 95,94 Mo Molybdeen	43 98 Tc Technetium	44 101,1 Ru Rutenium	45 102,9 Rh Rodium	46 106,4 Pd Palladium	47 107,8 Ag Zilver	48 112,4 Cd Cadmium	49 114,8 In Indium	50 118,7 Sn Tin	51 121,8 Sb Antimon	52 127,6 Te Telluur	53 126,9 I Jood	54 131,3 Xe Xenon
55 132,9 Cs Cesium	56 137,3 Ba Barium	57 138,9 La Lanthaan	72 178,5 Hf Hafnium	73 181,0 Ta Tantaal	74 183,8 W Wolfram	75 186,2 Re Rений	76 193,2 Os Osmium	77 197,2 Ir Iridium	78 195,1 Pt Platina	79 197,0 Au Goud	80 200,6 Hg Kwik	81 204,4 Tl Thalium	82 207,2 Pb Loed	83 209,0 Bi Bismut	84 (210) Po Polonium	85 (210) At Astatium	86 (222) Rn Radon
87 (223) Fr Francium	88 (226) Ra Radium	89 (227) Ac Actinium	104 (261) Rf Rutherfordium	105 (262) Db Dubnium	106 (263) Sg Seaborgium	107 (263) Bh Bohrium	108 (265) Hs Hassium	109 (266) Mt Meitnerium	110 (271) Ds	111 (272) Rg	112 (273) Cn	(113)	(114)	(115)	116 (289)	(117)	118 (288)
(119)	(120)	(121)															
Lanthaniden		58 140,1 Ce Cerium	59 140,9 Pr Praseodymium	60 144,2 Nd Neodymium	61 146,9 Pm Promethium	62 150,4 Sm Samarium	63 152,0 Eu Europium	64 157,2 Gd Gadolinium	65 158,9 Tb Terbium	66 162,5 Dy Dyspromium	67 164,9 Ho Holmium	68 167,3 Er Erbium	69 168,9 Tm Thulium	70 173,0 Yb Ytterbium	71 175,0 Lu Lutetium		
Actiniden		90 232,0 Th Thorium	91 231,0 Pa Protactinium	92 238,0 U Uraan	93 237,0 Np Neptunium	94 239,0 Pu Plutonium	95 241,1 Am Americium	96 242,1 Cm Curium	97 248,1 Bk Berkelium	98 251,1 Cf Californium	99 254,1 Es Einsteinium	100 257,1 Fm Fermium	101 258,1 Md Mendelevium	102 259 No Nobelium	103 267 Lr Lawrencium		
Superactiniden		(122-153)															

(Voncken, 2010)

Figuur 2. Het periodiek systeem der elementen met de Lanthanide-groep (La, en Ce – Lu).

De naam Zeldzame Aarden (ook wel Zeldzame Aardmetalen) is eigenlijk niet correct. Het betreft geen Aard(alkali)metalen (groep II in het Periodiek systeem). Ze behoren tot de overgangsmetalen. Als zuiver metaal komen de REE niet in denatuur voor. Aan de lucht oxideren ze heel gemakkelijk. De Zeldzame Aarden zijn hoofdzakelijk ontdekt in de 19e

eeuw. Het woord "Aarde" komt van het Franse *terre* (veel zeldzame aardelementen zijn ontdekt door Franse onderzoekers). *Terre* kon vroeger ook oxide betekenen. Men nam aan dat deze elementen relatief zeldzaam waren, omdat er vrij weinig ertsen van zijn. Zo ontstond de naam Zeldzame Aardelementen. Ze zijn echter (met uitzondering van het instabiele promethium) helemaal niet zeldzaam! De abundantie (=hoeveelheidsverhouding) van het meest voorkomende zeldzame aardelement, cerium (Ce), is 68 ppm (parts per million, ofwel delen per miljoen). Daarmee is het het 25e element in de aardkorst. Dat betekent dat het vaker voorkomt dan lood (Pb). Lutetium, een van de zeldzaamste Zeldzame Aardelementen, is qua hoeveelheidsverhouding 200 minder zeldzaam dan goud (Au). Maar in contrast met bijvoorbeeld Cu, Pb, en Zn en de edelmetalen Au, Ag, en Pt komen de REE echter zelden in geconcentreerde vorm voor. Het aantal exploiteerbare afzettingen is daarom gering (Voncken, 2010).

De mineralen van de REE komen vaak voor in granitische stollingsgesteenten en pegmatieten, en in het bijzonder in relatie tot carbonatietgesteenten (magmatische carbonaatgesteenten). Verder zijn alluviale afzettingen van zware mineralen vaak een bron. (Voncken, 2010)

### **De bekendste REE-afzettingen**

De allerbekendste afzettingen van REE zijn de enorme Bayan Obo afzetting in Binnen-Mongolië, China, en de Mountain Pass afzetting in Californië, USA (Voncken, 2010).

### **Bayan Obo**

Bayan Obo (Figuur 3) is een zeer grote REE-Fe-Nb afzetting met een complexe oorsprong. De reserves worden geschat op meer dan 40 miljoen ton REE-erts met een gehalte van 3- 5,4 % REE. Dat is 70% van de in de wereld bekende REE-reserves! Verder is er een reserve van 1 miljoen ton Nb-erts en 470 miljoen ton ijzererts. De REE-vererfsing wordt met carbonatieten (magmatische carbonaatgesteenten) in verband gebracht (Voncken, 2010).



(Voncken, 2010)

Figuur 3. China en Binnen-Mongolië. De witte stip geeft de locatie van de Bayan Obo afzetting aan. Wikimedia Commons

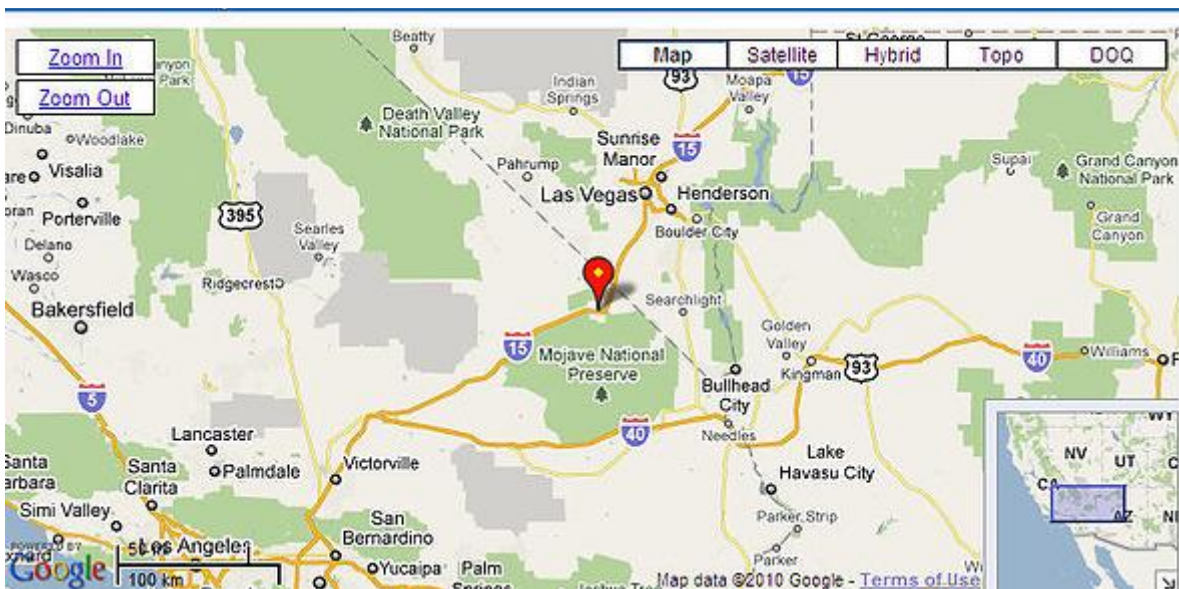


(Voncken, 2010)

Figuur 4. De Mountain Pass mijn, Californië. USGS Factsheet 087-02

### Mountain Pass

De Californische Mountain-Pass mijn (Figuur 4, 5) ligt vlak bij het Mojave National Preserve, bij de grens met de staten Nevada en Arizona. De Mountain-Pass afzetting is een aan carbonatiet gerelateerde REE-afzetting. De oude, al 50 jaar producerende mijn is nu uitgeput. Momenteel gaat men een vlakbij gelegen nieuwe REE-afzetting ontginnen. De verwachting is dat deze in 2012 een productie zal leveren van naar schatting 15.000 ton REO (Zeldzame Aarde Oxide) per jaar (Voncken, 2010).



(Voncken, 2010)

Figuur 5. De locatie van Mountain Pass. Google Maps

## De Zeldzame-Aarde-Mineralen

De REE komen in de natuur niet vrij als oxide voor, maar alleen in enkele mineralen (Figuur 6). De belangrijkste REE-mineralen zijn (Voncken, 2010):

\* *Monaziet*,  $CePO_4$ , bevat gewoonlijk ook La, Pr, Nd, Y en kleine hoeveelheden Th. Ook Sm en Eu komen in monaziet voor. Thorium (Th) maakt monaziet licht radioactief.

\* *Xenotiem*,  $YPO_4$ , bevat gewoonlijk ook de zwaardere REE zoals Dy, Er, Gd, en Yb, en meestal ook U en/of Th. Ook xenotiem is meestal licht radioactief.

\* *Bastnaesiet*,  $(Ce, La)CO_3F$ , waarbij de hoeveelheden Ce en La sterk kunnen verschillen. Ook Y komt wel in bastnaesiet voor (Voncken, 2010).

Monaziet en xenotiem uit aan carbonatieten gerelateerde afzettingen bevatten meestal geen uranium of thorium en zijn dus niet radioactief (Voncken, 2010).



(Voncken, 2010)

Figuur 6. Van links naar rechts: Monaziet ( $CePO_4$ ), Xenotiem\_ ( $YPO_4$ ) en Bastnaesiet ( $(Ce, La)CO_3F$ ). Wikimedia Commons

## De Toepassingen van REE

Hierbeneden zijn de belangrijkste toepassingen van de REE aangehaald (zie ook Figuur 7). Het zal vrij snel duidelijk worden dat de toepassingen van de REE voornamelijk hightech-toepassingen betreft. De bijna-monopoliepositie van China op het gebied van REE stemt dan wel tot nadenken (Voncken, 2010).

**Scandium** (Sc) is vrij lastig te isoleren. Het wordt niet veel toegepast. De weinige toepassingen zijn onder andere te vinden in legeringen zoals scandium-aluminiumlegeringen (Voncken, 2010).

**Yttrium** (Y) wordt vooral gebruikt in de automobielindustrie in materialen die de brandstofverbruik efficiëntie verhogen. Ook is yttrium belangrijk in microgolf-communicatietoestellen. Yttrium-IJzer-Granaten,  $Y_3Fe_5O_{12}$ , (YIG) worden gebruikt als resonators, frequentiemeters, magneetveldmeters, transistors en oscillatoren. Yttrium-Aluminium-Granaat,  $Y_3Al_5O_{12}$ , (YAG) wordt voornamelijk gebruikt in lasers. Deze YAG-

kristallen in de lasers worden vaak gedoteerd met andere REE (Nd, Gd, Er, of Ho) (Voncken, 2010).

**Lanthanum** of lanthaan (La) is een strategisch belangrijke REE, vanwege de toepassing in katalysatoren die essentieel zijn in petroleumraffinage. Lanthaan wordt ook gebruikt voor infrarood absorptie in glas. Oplaadbare lanthaan-nikkel-hydride (La-Ni-H) batterijen vervangen inmiddels gradueel Ni-Cd batterijen in computer- en communicatietechnologietoepassingen (Voncken, 2010).

**Cerium** (Ce) is het meest voorkomend van de Zeldzame Aardelementen. Ceriumoxide en andere ceriumverbindingen gaan in katalytische converters en andere apparatuur om zwaveloxide-emissies te verkleinen. Cerium wordt verder als additief in dieselbrandstof, in UV-absorberend glas, en in legeringen gebruikt (Voncken, 2010).

**Praseodymium** (Pr) wordt in het bijzonder als pigment gebruikt. Verder wordt praseodymium, samen met neodymium gebruikt om bepaalde golflengten van licht te filteren. Praseodymium wordt ook gebruikt in permanente magneten, en in katalysatoren in verbrandingsmotoren (Voncken, 2010).

**Neodymium** (Nd) is een kritische component van moderne sterke permanente magneten. Mobiele telefoons, harde schijven, draagbare Cd-spelers, computers, en de meeste moderne geluidssystemen zouden niet bestaan zonder neodymiummagneten. De sterkste permanente magneet die bekend is, is de Neodymium-IJzer-Borium magneet met de chemische formule  $Nd_2Fe_{14}B$ . Ook wordt neodymium gebruikt voor ultravioletabsorptie in glas. Tenslotte wordt het gebruikt in variaties op de Yttrium-Aluminium-Granaat (YAG), als Nd-YAG (Voncken, 2010).

**Promethium** (Pm) is een instabiel element. Het komt in de natuur zo goed als niet voor. In kernreactoren wordt promethium bereid voor een aantal toepassingen. Van promethium zijn een 36-tal isotopen bekend. De stabielste hebben een halfwaardetijd variërend van 2,72 tot 17,7 jaar. Promethium wordt als bron van bètastraling gebruikt voor het uitvoeren van diktebepalingen en in nucleaire batterijen. In deze laatste zetten fotocellen licht om in elektrische stroom (Voncken, 2010).

**Samarium** (Sm) wordt gebruikt voor de productie van hele krachtige magneten ( $SmCo_5$ ). Ook wordt het in optische filters gebruikt. In kerncentrales wordt het als neutronenvanger gebruikt. Samariumoxide kan infraroodlicht absorberen, en voor dit doel wordt het toegepast in glas. Ook wordt samariumoxide gebruikt als katalysator bij de dehydratie (ontdoen van water) en de dehydrogenatie (ontdoen van waterstof) van ethanol. De radioactieve isotoop Sm-153 wordt wel ingezet voor de behandeling van botkanker (Voncken, 2010)



**Europium** (Eu) wordt vooral gebruikt als fosforescerende stof met de kleur rood in televisieschermen en computerschermen (beeldbuizen en LCD-schermen). Ook wordt europium in de medische wereld gebruikt voor het “merken” van complexe biochemische reagentia voor weefselonderzoek (Voncken, 2010).

**Gadolinium** (Gd) wordt gebruikt in magneto-optische opnametechnologie, en andere technologie m.b.t. het verwerken van computerdata. Gadolinium-Yttrium-Aluminium-Granaat (Gd:YAG) is een variatie van Nd:YAG met microgolf- en lasertoepassingen (Voncken, 2010).

**Terbium** (Tb) wordt gebruikt in energie-efficiënte fluorescerende lampen. In magneto-optische data opslag worden ook wel terbiumlegeringen gebruikt. Het gebruik van terbium is echter beperkt (Voncken, 2010).

**Dysprosium** (Dy) wordt veel gebruikt in elektronica. Het hoge smeltpunt, en het vermogen om neutronen te absorberen maken dat dysprosium ook wordt toegepast in nucleaire controle toepassingen. In combinatie met andere REE en vanadium wordt dysprosium gebruikt voor de vervaardiging van lasers (Voncken, 2010).

**Holmium** (Ho) is één van de zeldzaamste REE. Holmium wordt gebruikt als magnetische flux concentrator. Ook wordt het toegepast in kernreactors als neutronenvanger. Holmiumoxide kan een gele kleur hebben, (ook roze, dat is holmiumoxide met een andere structuur). In de glasindustrie wordt holmiumoxide daarom gebruikt als pigment om glas te kleuren. Holmium wordt ook gebruikt als dotering in YAG-lasers. Tenslotte wordt holmium als legeringsmetaal gebruikt (Voncken, 2010).

**Erbium** (Er) wordt gebruikt in glasvezels. Als wordt het gebruikt als dotering <sup>[1]</sup> in YAG-lasers. Het is ook een legeringsmetaal. Omdat erbium neutronen kan absorberen, kan het als neutronenvanger in kernreactoren worden gebruikt. Erbiumoxide heeft een roze kleur, en wordt daarom gebruikt voor het kleuren van glas. Ook heeft het toepassingen in de opto-electronica (Voncken, 2010).

**Thulium** ( Tm ) is het zeldzaamste (en het duurste) van de REE. Thulium wordt zeer weinig gebruikt (Voncken, 2010).

**Ytterbium** (Yb) lijkt globaal op yttrium qua chemisch gedrag. Onder hoge mechanische spanning neemt de elektrische weerstand sterk toe. Ytterbium wordt in spanningssensoren voor bodemdeformatie gebruikt. Andere toepassingen van Ytterbium zijn in optische elementen, in bijvoorbeeld glasvezelversterkers. Ook wordt het toegepast in glasvezelversterkers, in de vorm van fosforen (lichtgevende stoffen) in bijvoorbeeld beeldschermen, maar ook in lasers (Voncken, 2010).

**Lutetium** (Lu), is samen met thulium een van de zeldzaamste REE. Daar lutetium dus ook een van de duurste REE is, wordt het sporadisch gebruikt.

Tot slot een niet-hightech toepassing: vuursteentjes in aanstekers bestaan vaak ook uit legeringen van REE (hoofdzakelijk Ce, La, met soms kleinere hoeveelheden Pr en vroeger ook Nd), het zogenaamde “Mischmetaal” of ferrocerium. Dit bevat ook Fe en Mg voor slijtvastheid (Voncken, 2010).

### **Tot slot**

De Zeldzame Aardelementen zullen door hun hightech toepassingen steeds belangrijker worden. Het is aan te nemen, dat door een verwacht tekort aan deze metalen in de nabije toekomst, men intensief exploratie zal gaan doen naar afzettingen die deze metalen bevatten. Dit zal waarschijnlijk voornamelijk in Zuid-Afrika, Brazilië en de VS plaatsvinden. Recycling van REE staat grotendeels nog in de kinderschoenen (Voncken, 2010).

## Bijlage 7: berekening index, wisselkoers en normaal verdeling

### How the CPI is used to make these calculations

What would an item or service purchased in 2014 be worth in 19?? dollars?

Example:

The CPI is used to calculate how prices have changed over the years. Let's say you have \$7 in your pocket to purchase some goods and services today. How much money would you have needed in 1950 to buy the same amount of goods and services?

The CPI for 1950 = 24.1

The CPI for 2014 = 235.8\*

Use the following formula to compute the calculation:

1950 Price = 2014 Price x (1950 CPI / 2014 CPI\*)

\$0.72 = \$7.00 x (24.1 / 235.8)

What would an item or service purchased in 19?? be worth in 2014 dollars?

(The Federal Reserve Bank of Minneapolis, 2014)

### Example:

Let's say your parents told you that in 1950 a movie cost 25 cents. How could you tell if movies have increased in price faster or slower than most goods and services? To convert that price into today's dollars, use the CPI.

The CPI for 1950 = 24.1

The CPI for 2014 = 235.8\*

A movie in 1950 = \$0.25

Use the following formula to compute the calculation:

2014 Price = 1950 Price x (2014 CPI\* / 1950 CPI)

\$2.42 = \$0.25 x (235.8 / 24.1)

A full-price movie at a Minneapolis theater costs between \$6.00 and \$10.00. Looks like movies have increased in price faster than most other goods and services.

(The Federal Reserve Bank of Minneapolis, 2014)

<http://www.rateinflation.com/consumer-price-index/euro-area-historical-cpi>

### **Berekening:**

#### **Methode 1:**

Eerst wordt de index zondanig berekend dat de kostprijs van 2014 wordt verkregen. Nadien worden de kosten in Dollar via de huidige wisselkoers omgezet naar Euro.

Consumer Price Index voor de kostprijzen in dollar:

CPI 2005: 195,3

CPI 2013: 233,0

CPI 2014: 235,8

(The Federal Reserve Bank of Minneapolis, 2014)

Consumer Price Index voor de kostprijs in Euro:

CPI 2007: 104,36

CPI 2014: 118,02

(Rate Inflation, 2014)

Radkowsky Thorium brandstof (2005)			
activiteit	Kosten (\$/MWh)	Index aanpassing (\$/MWh)	Kosten (€/MWh)
Front end	3,60	4,35	3,18
Back end	0,55	0,66	0,48
Totaal	4,15	5,01	3,66

Voor het omrekenen van Dollar naar Euro werd de koers van \$1=€0,73 (10/05/2014) gebruikt (Exchange Rates, 2014).

Uranium dioxide brandstof (2013)			
activiteit	Kosten (\$/MWh)	Index aanpassing (\$/MWh)	Kosten (€/MWh)
Front end	4,47	4,52	3,30
Back end	1,37	1,39	1,01
Totaal	5,84	5,91	4,31

Voor het omrekenen van Dollar naar Euro werd de koers van \$1=€0,73 (10/05/2014) gebruikt (Exchange Rates, 2014).

Radkowsky Thorium brandstof (2013)			
Activiteit	Kosten (\$/MWh)	Index aanpassing (\$/MWh)	Kosten (€/MWh)
Front end	3,51	3,55	2,59
Back end	0,81	0,82	0,60
Totaal	4,32	4,37	3,19

Voor het omrekenen van Dollar naar Euro werd de koers van \$1=€0,73 (10/05/2014) gebruikt (Exchange Rates, 2014).

Uranium dioxide brandstof (2007)			
Activiteit	Kosten (€/MWh)	Index aanpassing (€/MWh)	Kosten (€/MWh)
Front end	3,49	3,95	3,95
Back end	2,12	2,40	2,40
Totaal	5,61	6,35	6,35

#### Methode 2:

Eerst worden alle kostprijzen omgezet naar Euro. Vervolgens wordt de index zondanig berekend dat de kostprijs van 2014 wordt verkregen.

Consumer Price Index voor de kostprijs in Euro:

CPI 2005: 100,00

CPI 2007: 104,36

CPI 2013: 117,61

CPI 2014: 118,02

(Rate Inflation, 2014)

Radkowsky Thorium brandstof (2005)			
activiteit	Kosten (\$/MWh)	Kosten (€/MWh)	Index aanpassing (€/MWh)
Front end	3,60	2,81	3,32
Back end	0,55	0,43	0,51
Totaal	4,15	3,24	3,83

Voor het omrekenen van Dollar naar Euro werd de koers van \$1=€0,78 (01/05/2005) gebruikt (Dollarkoers, 2014).

Uranium dioxide brandstof (2007)			
activiteit	Kosten (€/MWh)	Kosten (€/MWh)	Index aanpassing (€/MWh)
Front end	3,49	3,49	3,95
Back end	2,12	2,12	2,40
Totaal	5,61	5,61	6,35

Radkowsky Thorium brandstof (2013)			
Activiteit	Kosten (\$/MWh)	Kosten (€/MWh)	Index aanpassing (€/MWh)
Front end	3,51	2,70	2,71
Back end	0,81	0,62	0,62
Totaal	4,32	3,32	3,33

Voor het omrekenen van Dollar naar Euro werd de koers van \$1=€0,77 (01/06/2013) gebruikt (Exchange Rates, 2014).

Uranium dioxide brandstof (2013)			
activiteit	Kosten (\$/MWh)	Kosten (€/MWh)	Index aanpassing (€/MWh)
Front end	4,47	3,44	3,45
Back end	1,37	1,05	1,05
Totaal	5,84	4,49	4,50

Voor het omrekenen van Dollar naar Euro werd de koers van \$1=€0,77 (01/06/2013) gebruikt (Exchange Rates, 2014).

Vergelijking methode 1 versus methode 2

	<b>Uranium dioxide brandstof</b>				<b>Radkowsky Thorium brandstof</b>			
	Kosten België CREG (2007)		Kosten Wereldprijs (2013)		Kosten Wereldprijs IAEA (2005)		Kosten Wereldprijs WNA, Lightbridge, NWU (2013)	
Activiteit	(1)*	(2)**	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
Front end (€/MWh)	3,95	3,95	3,30	3,45	3,18	3,32	2,59	2,71
Back end (€/MWh)	2,40	2,40	1,01	1,05	0,48	0,51	0,60	0,62
Totaal(€/MWh)	6,35	6,35	4,31	4,50	3,66	3,83	3,19	3,33

\*(1) : Methode 1

\*\* (2) : Methode 2

## Masterproef: Berekening Betrouwbaarheidsinterval

### Uranium methode 1

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \frac{6,35 + 4,31}{2} = 5,33 \\ \sigma^2 &= 1,04 \\ \sigma &= 1,02 \end{aligned} \left. \begin{array}{l} n < 30 \\ \sigma^2 \text{ bekend} \end{array} \right\} \Rightarrow \underline{\underline{z}}$$

$$P\left(-z_{\frac{\alpha}{2}} \leq \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} \leq z_{\frac{\alpha}{2}}\right) = 1 - \alpha$$

$$\begin{aligned} 90\% \text{ BI} &\Rightarrow 1 - \alpha = 0,90 \\ \alpha &= 0,10 \\ \frac{\alpha}{2} &= 0,05 \end{aligned}$$

90% BI voor  $\mu$

$$\begin{aligned} &\left[ \bar{x} - z_{0,05} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} ; \bar{x} + z_{0,05} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right] \\ \Leftrightarrow &\left[ 5,33 - 1,64 \frac{1,02}{\sqrt{2}} ; 5,33 + 1,64 \frac{1,02}{\sqrt{2}} \right] \\ \Leftrightarrow &\underline{\underline{[4,45 ; 6,51]}} \end{aligned}$$



### Thorium methode 1

$$\bar{x} = \frac{3,66 + 3,19}{2} = 3,43$$

$$\sigma^2 = 0,055$$

$$\sigma = 0,24$$

$$\left[ 3,43 - 1,64 \frac{0,24}{\sqrt{2}} ; 3,43 + 1,64 \frac{0,24}{\sqrt{2}} \right]$$

$$\Rightarrow \underline{\underline{[3,15 ; 3,71]}}$$

### Uranium methode 2

$$\bar{x} = \frac{6,35 + 4,50}{2} = 5,43$$

$$\sigma^2 = 0,86$$

$$\sigma = 0,93$$

$$\Rightarrow \underline{\underline{[4,35 ; 6,51]}}$$

### Thorium methode 2

$$\bar{x} = \frac{3,83 + 3,33}{2} = 3,58$$

$$\sigma^2 = 0,07$$

$$\sigma = 0,27$$

$$\Rightarrow \underline{\underline{[3,27 ; 3,89]}}$$

## Bijlage 8: ionenwisselharsen

An ion-exchange resin or ion-exchange polymer is an insoluble matrix (or support structure) normally in the form of small (0.5-1 mm diameter) beads, usually white or yellowish, fabricated from an organic polymer substrate. The beads are typically porous, providing a high surface area. The trapping of ions occurs with concomitant releasing of other ions; thus the process is called ion-exchange. There are multiple types of ion-exchange resin. The most commercial resins are made of polystyrene sulfonate (Wikipedia, 2014).

Ion-exchange resins are widely used in different separation, purification, and decontamination processes. The most common examples are water softening and water purification. In many cases ion-exchange resins were introduced in such processes as a more flexible alternative to the use of natural or artificial zeolites. Also, ion exchange resins are highly effective in the biodiesel filtration process (Wikipedia, 2014).

Most typical ion-exchange resins are based on crosslinked polystyrene. The actual ion exchanging sites are introduced after polymerization. Additionally, in the case of polystyrene, crosslinking is introduced via copolymerization of styrene and a few percent of divinylbenzene. Non-crosslinked polymers are soluble in water. Crosslinking decreases ion-exchange capacity of the resin and prolongs the time needed to accomplish the ion exchange processes. Particle size also influences the resin parameters; smaller particles have larger outer surface, but cause larger head loss in the column processes (Wikipedia, 2014).

Besides being made as bead-shaped materials, ion exchange resins are produced as membranes. The membranes, which are made of highly cross-linked ion exchange resins that allow passage of ions, but not of water, are used for electrodialysis (Wikipedia, 2014).

There are four main types differing in their functional groups:

- strongly acidic (typically, sulfonic acid groups, e.g. sodium polystyrene sulfonate or polyAMPS)
- strongly basic, (quaternary amino groups, for example, trimethylammonium groups, e.g. polyAPTAC)
- weakly acidic (mostly, carboxylic acid groups)
- weakly basic (primary, secondary, and/or ternary amino groups, e.g. polyethylene amine)

(Wikipedia, 2014)

There are also specialized types:

- chelating resins (iminodiacetic acid, thiourea, and many others)

(Wikipedia, 2014)

Ion-exchange processes are used to separate and purify metals, including separating uranium from plutonium and other actinides, including thorium; and lanthanum, neodymium, ytterbium, samarium, lutetium, from each other and the other lanthanides. There are two series of rare earth metals, the lanthanides and the actinides. Members of each family have very similar chemical and physical properties. Ion-exchange was for many years the only practical way to separate the rare earths in large quantities. This application was developed in the 1940s by Frank Spedding. Subsequently, solvent extraction has mostly supplanted use of ion exchange resins except for the highest purity products (Wikipedia, 2014).

A very important case is the PUREX process (plutonium-uranium extraction process) which is used to separate the plutonium and the uranium from the spent fuel products from a nuclear reactor, and to be able to dispose of the waste products. Then, the plutonium and uranium are available for making nuclear-energy materials, such as new reactor fuel and nuclear weapons (Wikipedia, 2014).

Ion-exchange beads are also an essential component in In-situ leach uranium mining. In-situ recovery involves the extraction of uranium-bearing water (grading as low as .05%  $U_3O_8$ ) through boreholes. The extracted uranium solution is then filtered through the resin beads. Through an ion exchange process, the resin beads attract uranium from the solution. Uranium loaded resins are then transported to a processing plant, where  $U_3O_8$  is separated from the resin beads and yellowcake is produced. The resin beads can then be returned to the ion exchange facility where they are reused (Wikipedia, 2014).

The ion-exchange process is also used to separate other sets of very similar chemical elements, such as zirconium and hafnium, which incidentally is also very important for the nuclear industry. Zirconium is practically transparent to free neutrons, used in building reactors, but hafnium is a very strong absorber of neutrons, used in reactor control rods (Wikipedia, 2014).

## Bijlage 9: Verglazing & Ontsmetting kernafval

### Verglazing

Long-term storage of radioactive waste requires the stabilization of the waste into a form which will neither react nor degrade for extended periods of time. One way to do this is through vitrification. Currently at Sellafield the high-level waste (PUREX first cycle raffinate) is mixed with sugar and then calcined. Calcination involves passing the waste through a heated, rotating tube. The purposes of calcination are to evaporate the water from the waste, and de-nitrate the fission products to assist the stability of the glass produced (Wikipedia, 2014).

The 'calcine' generated is fed continuously into an induction heated furnace with fragmented glass. The resulting glass is a new substance in which the waste products are bonded into the glass matrix when it solidifies. This product, as a melt, is poured into stainless steel cylindrical containers ("cylinders") in a batch process. When cooled, the fluid solidifies ("vitrifies") into the glass. Such glass, after being formed, is highly resistant to water (Wikipedia, 2014).

After filling a cylinder, a seal is welded onto the cylinder. The cylinder is then washed. After being inspected for external contamination, the steel cylinder is stored, usually in an underground repository. In this form, the waste products are expected to be immobilized for thousands of years (Wikipedia, 2014).

The glass inside a cylinder is usually a black glossy substance. All this work (in the United Kingdom) is done using hot cell systems. The sugar is added to control the ruthenium chemistry and to stop the formation of the volatile  $\text{RuO}_4$  containing radioactive ruthenium isotopes. In the West, the glass is normally a borosilicate glass (similar to Pyrex), while in the former Soviet bloc it is normal to use a phosphate glass. The amount of fission products in the glass must be limited because some (palladium, the other Pt group metals, and tellurium) tend to form metallic phases which separate from the glass. Bulk vitrification uses electrodes to melt soil and wastes, which are then buried underground. In Germany a vitrification plant is in use; this is treating the waste from a small demonstration reprocessing plant which has since been closed down (Wikipedia, 2014).

## **Ontsmetting**

De ontmanteling van de Belgische nucleaire installaties is de belangrijkste bron van radioactief afval die NIRAS in de toekomst zal moeten beheren. Het is dus belangrijk dat de ontmantelingswerkzaamheden zodanig worden uitgevoerd dat het geproduceerde volume radioactief afval zoveel mogelijk wordt beperkt. Deze volumebeperking kan onder meer worden bereikt door het verbeteren van de ontsmettingstechnieken (NIRAS, 2014).

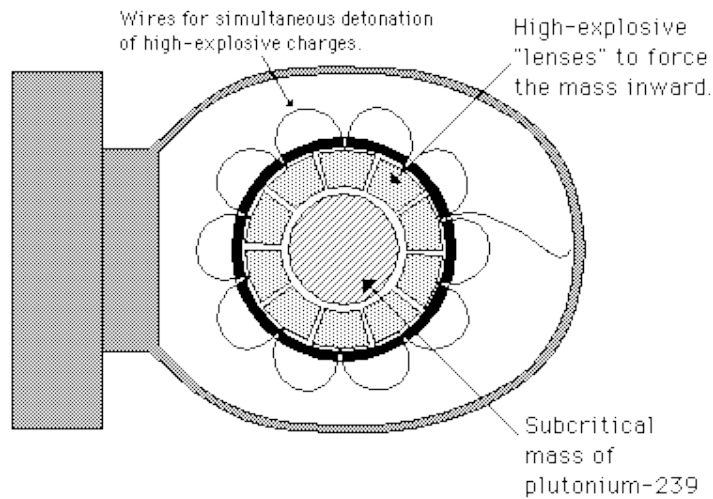
Dankzij de ontsmetting, die wordt uitgevoerd door middel van mechanische (bijvoorbeeld door waterstralen onder druk of door afschrappen) of chemische procedés (bijvoorbeeld door oplossing), wordt vermeden dat een groot deel van de verwijderde materialen als radioactief afval moeten worden beheerd. Ze biedt de mogelijkheid sommige ontmantelde onderdelen opnieuw te gebruiken of de grondstoffen te recycleren. De ontsmette materialen en installaties kunnen worden vrijgegeven, omdat het gebruik ervan geen radiologisch risico meer vormt (NIRAS, 2014).

Dankzij de ontsmetting wordt slechts een klein percentage van de materialen die aanwezig zijn op een nucleaire site uiteindelijk radioactief afval. Dit afval, hoofdzakelijk beton en metalen, volgt dezelfde fysieke en administratieve weg als het exploitatieafval van nucleaire installaties. Het gaat vooral om geactiveerde of niet-ontsmetbare uitrustingen en structuurelementen, residu's afkomstig van de ontsmetting van ontsmetbare uitrustingen en structuurelementen, alsook om grond verontreinigd door radioactieve stoffen (NIRAS, 2014).

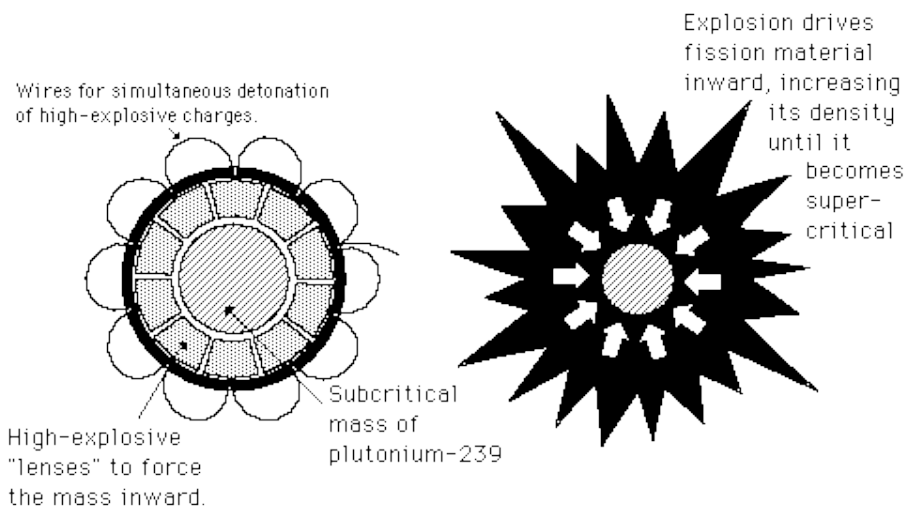
De materialen die niet langer als radioactief afval worden beschouwd, verdwijnen uit het nucleaire circuit, met of zonder voorafgaande ontsmetting, maar altijd na radiologische metingen en vrijgave. Het metaal gaat in principe naar smelterijen, terwijl het beton en de andere bouwmaterialen vooral bestemd zijn voor wegebouw (NIRAS, 2014).

## Bijlage 10: Gun type & implosion type

### Implosion type

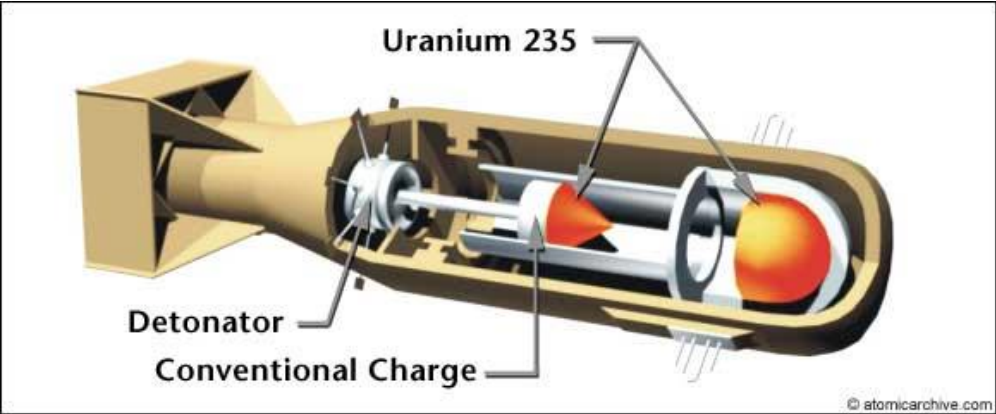


(Hyperphysics, Implosion Type)



(Hyperphysics, Implosion Detonation)

**Gun type**



(Archive)

## Verklaring op woord van eer

Ik verklaar dat ik deze aan de Faculteit TEW ingediende masterproef zelfstandig en zonder hulp van andere dan de vermelde bronnen heb gemaakt.

Ik bevestig dat de direct en indirect overgenomen informatie, stellingen en figuren uit andere bronnen als zodanig aangegeven zijn in overeenstemming met de richtlijnen over plagiaat in de masterproefbrochure.

Ik bevestig dat dit werk origineel is, aan geen andere onderwijsinstelling werd aangeboden en nog niet werd gepubliceerd.

Ik ben mij bewust van de implicaties van fraude zoals beschreven in artikel 18 van het onderwijs- en examenreglement van de Universiteit Antwerpen. ([ww.ua.ac.be/oer](http://ww.ua.ac.be/oer))

Datum .....

Naam .....

Handtekening .....