

LiCl 용융염계에서 환원된 금속전환체의 특성분석 Analysis of Reduced Metal Ingot Properties in LiCl Molten Salt

오승철, 신희성, 황용수, 김익수, 서중석, 박성원

한국원자력연구소
대전시 유성구 덕진동 150

요 약

본 연구에서는 고온 용융염계에서 산화물 핵연료의 금속전환으로 인한 발열량 및 방사능 감소량의 정량적인 평가와 단위공정의 기준요건의 기초자료 확보를 위해 사용후핵연료 차세대관리공정의 예상 물질수지를 작성하였다. ORIGEN2 코드를 이용하여 금속전환체의 발열량과 방사능을 계산한 결과, 금속전환체는 산화물 사용후핵연료 발열량과 방사능의 24.27 %와 24.24 %를 나타내었다.

Abstract

The mass balance in the Advanced Spent Fuel Management Process was made to secure the basic information on the unit processes. Based on this mass balance, the change in decay heat and radioactivity of spent fuel due to the metallization in the high temperature molten salt system was estimated. The decay heat and the radioactivity were calculated by the ORIGEN2 computer code. It showed that the heat and the radioactivity of the metallized spent fuel ingot were 24.27 % and 24.24 %, respectively of those of spent fuel oxide.

1. 서 론

사용후핵연료 차세대관리공정은 LiCl 용융염계에서 산화물 핵연료를 Li 금속으로 환원하는 금속전환공정을 근간으로 하는 공정으로, 금속전환과정에서 알카리, 알카리 토금속 및 일부 RE 원소를 제외한 모든 핵분열생성물과 우라늄, 플루토늄 등은 모두 금속으로 전환되는 특성을 갖고 있다[1,2,3]. 고온 LiCl 용융염계에서 산화물 핵연료의 금속전환특성과 일부 핵분열생성물의 선택적 분리성은 부피감용 이외에 방사능 및 발열량도 획기적으로 줄일 수 있는 부가적인 장점을 제공한다. 이와 같은 관점에서 고온 LiCl 용융염계에서 산화물 핵연료를 금속전환하여 저장관리할 경우, 사용후핵연료 저장시설의 저장성 향상은 물론 저장 안전성 요건의 완화측면에서 매우 바람직할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 이러한 고온 용융염계에서의 화학적 특성을 이용한 고유의 핵비확산성 사용후핵연료 차세대관리개념을 제안

하였고, 실험실 규모의 단위요소기술에 대한 반응성 규명을 통해 독자적인 차세대관리공정 flow sheet를 확립하였다.

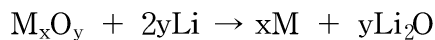
사용후핵연료 차세대관리기술의 핵심공정인 산화물 핵연료 건식 분말화공정, 금속전환공정 및 용융염 회수공정 등은 실험실 규모의 실험을 통한 반응성 검증 실험결과, 금속전환실험에서 우라늄 산화물 및 NM 원소는 고온 LiCl 용융염의 Li 금속과 반응하여 97 % 이상 금속으로 전환되는 특성을 나타내었고, 대표적인 알카리 및 알카리 토금속인 Cs과 Sr원소는 LiCl 용융염계에서 염화물로 전환됨을 확인하였다.

본 연구에서는 고온 용융염계에서 산화물 핵연료의 금속전환으로 인한 발열량 및 방사능 감소량의 정량적인 평가와 더불어 각 단위공정별 기준요건의 기초자료 확보를 위해 실험실 규모의 반응성 실험결과와 기 발표된 문헌을 토대로 예상 물질수지를 작성하였다. 산화물 핵연료의 금속전환특성은 단지 LiCl-Li-Li₂O 용융염계에서 단일성분에 대한 반응메카니즘만을 고려하여 예상 물질수지를 작성하였다. 또한 LiCl-Li-Li₂O계에서 생성된 반응생성물의 물리적 특성을 고려하여 금속전환체와 용융염에 대한 stream을 결정하였고, 이를 기준으로 금속전환체의 발열량과 방사능을 ORIGEN2 코드를 이용하여 계산하였다.

2. 고온 LiCl 용융염계에서 사용후핵연료내 주요원소의 화학적 특성

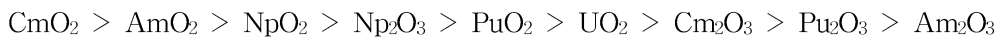
가. 우라늄 및 TRU원소

우라늄 및 TRU 산화물은 650 °C 반응온도 조건에서 LiCl 용융염계의 Li 금속과 반응하여 금속으로 전환된다.



M = Am, Cm, Np, Pu와 U

LiCl 용융염은 650 °C 조건에서 Li 금속과 반응 부생성물인 Li₂O에 대하여 각각 0.5 mol %와 11.9 mol %의 용해도를 갖고 있어 반응속도 향상 등의 반응매질로서 유리한 특성을 나타낸다. LiCl 용융염계에서 우라늄 및 TRU 산화물의 금속전환반응은 LiCl 용융염계 Li₂O의 농도에 의존됨을 나타내고 있다. 특히 AmO₂는 우선 3가의 산화물로 전환되고 금속으로 전환되는 메카니즘을 나타내고 있다. 이와 같은 반응메카니즘에서 3가 산화물이 금속으로 전환되기 위해서는 LiCl 용융염계의 Li₂O의 한계분율은 650 °C의 조건에서 0.046이하로 유지되어야 함을 이론적으로 제시하고 있다[4]. 플루토늄 산화물의 금속전환 반응메카니즘은 더욱 복잡하여 3가, 2가의 산화물로 전환된 다음 최종적으로 금속으로 전환되는 특성을 나타내고 있고, 이들 중간물질을 금속으로 전환하기 위해서는 LiCl 용융염계 Li₂O 한계농도를 제어하는 것이 매우 중요하다. 우라늄 및 TRU 산화물을 포함한 중간물질은 다음과 같은 순서에 의해 환원반응이 진행되고, Am₂O₃의 LiCl 용융염계 Li₂O 한계농도이하의 조건에서는 완전히 환원된다.



이는 모의 사용후핵연료를 대상으로 한 실험결과와 일치된 결과를 나타내고 있으며, 특히 플루토늄 산화물은 LiCl 용융염계 Li₂O 용해도 이하에서는 Li₂O 농도와 무관하게 완전히 환원되나, Am₂O₃의 경우에는 LiCl 용융염계 Li₂O의 농도를 5 wt% 이하로 유지해야 완전히 환원반응이 진행된다[5].

나. 알카리 및 알카리 토금속 계열원소, Eu, Se, Te

알카리 및 알카리 토금속계열의 핵분열생성물은 LiCl 용융염계에서 염화물로 전환되고, 반응매질인 LiCl 용융염에 용해되는 특성을 갖고 있다. 특히 4가의 산화물은 LiCl-Li계에서 염화물과 Li₂O를 생성하는 반면에 2가의 산화물은 LiCl 용융염 자체와 반응하여 염화물로 전환되는 반응메카니즘을 나타내고 있다. 특히 Eu 원소는 LiCl 용융염계에서 산염화물과 복합산화물을 생성한다고 최근에 보고된 바 있으며[6], 이들 복합산화물은 LiCl 용융염보다 밀도(1.485 g/cm³)가 크고, LiCl 용융염에 대한 불용특성을 고려할 때 환원된 금속분말과 동반되어 회수될 것으로 예상된다. Se와 Te원소는 LiCl 용융염계의 Li금속과 반응하여 Li화합물을 생성하고, LiCl 용융염계에 용해되는 특성을 나타내고 있다. 표 1에 상기의 원소에 대한 화학 반응식을 요약정리하여 나타내었다.

다. RE계열 원소

희토류 원소는 표 2와 같이 산화물의 표준 생성자유에너지가 Li₂O 보다 작기 때문에 열역학적으로 금속전환반응이 진행되지 않는다. 희토류계열의 산화물은 대부분 sesqui oxide 형태로 존재하며, sesqui oxide는 LiCl 용융염계의 Li₂O와 반응성이 매우 큰 것으로 알려져 있다. Ce 산화물은 LiCl-Li₂O-Li계에서 4가에서 3가 산화물로 변환되나, 근본적으로 금속화가 되지 않는다. 반면에 Nd, Sm, Gd, Y, Lu 및 Pr원소는 표 1의 화학반응식과 같이 LiCl-Li₂O계에서 복합산화물로 전환되고, La원소는 복합산화물과 산염화물을 형성한다[6]. 생성된 일부 복합산화물은 표 3과 같이 LiCl 용융염계에 대해 매우 낮은 용해도를 나타내기 때문에 대부분 금속분말과 같이 동반 회수될 것으로 예상된다.

라. NM계열 원소

우라늄과 TRU원소와 유사한 반응메카니즘에 의해 NM원소는 LiCl-Li계에서 금속으로 전환된다. 표 2에서 보는 바와 같이 NM 산화물의 표준 생성자유에너지가 Li₂O 보다 크기 때문에 열역학적으로도 금속전환반응이 가능함을 나타내고 있다. 특히 NM원소의 금속전환반응은 우라늄 및 TRU 산화물과 같이 LiCl 용융염계 Li₂O의 한계농도에 의존하지 않음을 나타낸다.

3. 사용후핵연료 차세대관리공정의 물질수지

가. 사용후핵연료 차세대관리공정 Flow sheet

사용후핵연료 차세대관리공정은 그림 1과 같이 고온의 LiCl 용융염계에서 산화물 핵연료를 Li금속으로 환원하는 금속전환공정과 건식 분말화공정, Li회수공정 등의 핵심공정으로 구성된다. 일정크기로 절단된 사용후핵연료는 건식 분말화공정으로 도입되며, 500 °C 과잉 공기분위기에서 사용후핵연료 펠렛은 20 ~ 40 μm 입자크기의 U₃O₈ 산화물형태로 분말화되며, 동시에 대부분의 휘발성 핵분열생성물이 제거된다. 금속전환공정은 상기에서 설명한 바와 같이 우라늄 및 TRU 산화물의 금속전환율을 고려하여 LiCl 용융염계의 Li₂O농도를 3.2 wt%이하로 제어한다. 금속전환반응기에는 산화분말 형태로 도입되며, 산화물 핵연료는 상기에서 설명한 바와 같이 LiCl-Li₂O-Li계에서 다양한 반응메카니즘에 의해 금속, 염화물, 산염화물 혹은 복합산화물 등으로 변환된다. LiCl 용융염보다 비교적 밀도가 큰 금속분말과 복합산화물은 LiCl 용융염계로부터 직접 여과방법에 의해 분리되고, 3.2 wt%의 Li₂O를 포함

하고 있는 LiCl 용융염은 전기분해법에 의해 Li를 회수하고, 회수된 Li금속과 LiCl 용융염은 금속전환공정으로 재순환된다.

나. 기준 산화물 사용후핵연료

사용후핵연료 차세대관리공정의 물질수지 작성은 초기 농축도 3.2 wt%, 연소도 33 GWd/tU, 냉각기간 10년인 사용후핵연료를 기준으로 하였다. 사용후핵연료내의 우라늄, TRU 및 핵분열생성물의 조성은 ORIGEN2 코드를 사용하여 분석하였으며, 이의 결과를 표 4에 요약 수록하였다.

다. 단위공정별 물질수지 및 금속전환체의 예상조성

사용후핵연료 차세대관리공정의 물질수지는 상기에서 기술한 바와 같이 산화물 핵연료의 LiCl 용융염계에서의 화학적 거동과 단위요소기술에 대한 실험실 규모의 반응성 검증실험 결과를 토대로 설정하였다. 물질수지를 작성하기 위한 공정의 기준요건은 다음과 같다.

- 20 kgHM의 사용후핵연료는 절단 및 slitting된 후, 건식분말화 공정에 도입된다. 건식 분말화공정은 500 °C의 공기 과잉분위기 조건에서 평균입도 20 ~ 40 μm 입자크기의 분말형태로 전환되고, 휘발성 핵분열생성물은 이 단계에서 거의 제거된다.
- 금속전환반응기의 용량은 20 kgHM/batch이며 Li금속의 과잉율은 15 %, 최종 LiCl 용융염계의 Li_2O 농도는 3.2 wt% 이하로 제어한다. 직접여과된 금속분말에는 2.3 %의 LiCl 용융염이 동반되고, 이는 금속분말의 재용융 단계에서 회수하여 Li회수 전기분해 공정으로 재도입된다.
- Li회수 전기분해단계에서 95%의 Li금속이 회수되고, 이는 LiCl와 함께 금속전환공정으로 재도입된다.

상기의 공정요건을 기준으로 사용후핵연료 차세대관리공정의 단위공정별 예상 물질수지를 작성하였고, 이를 기준으로 금속전환체의 조성을 추정하였다.

4. 금속전환체의 특성분석

금속전환체 및 용융염 stream에 포함되는 핵종은 사용후핵연료 차세대관리공정의 물질수지를 기준으로 추정하였다. 특히 금속전환체의 열원계산은 보수적 관점에서 용융염에 잔류하는 원소를 제외한 나머지 핵종이 모두 금속전환체에 포함된다는 가정하에 수행하였다. 사용후핵연료 차세대관리공정에서 금속전환체의 stream으로부터 분리되는 Cs, Sr 등의 12개 핵종에 대한 질량, 방사능 및 발열량과 산화물 사용후핵연료와의 상대비를 표 6에 나타내었다. 특히 이트륨은 금속전환공정 LiCl-Li- Li_2O 계에서 복합산화물 형태로 변환되고, 금속전환체의 stream에 포함되지만, Y-90의 반감기가 64.1 시간으로 매우 짧기 때문에 제거되는 핵종으로 간주하여 계산하였다. 금속전환체의 절대 발열량과 시간에 따른 발열량 변화는 ORIGEN2 코드를 이용하여 붕괴열을 계산하였다[7]. 분석결과, 붕괴열은 예상한 바와 같이 지수함수로 감소하는 경향을 나타내었다. 본 분석에서는 시간에 따른 전체 발열량을 5개의 파라미터를 갖는 지수함수로 피팅하여 그림 2에 나타내었다. 그림 2와 같이 금속전환체의 시간에 따른 발열량은 $y = 98.18E^{-0072x} + 144.95E^{-0015x} + 23.18$ 의 함수와 매우 잘 일치하였다. 또한 금속전환체의 방사능도 상기와 동일한 방법으로 계산하였다. 이의 결과를 그림 3에 나타내었고, 시간에 따른 방사능은 $y = 905.35E^{-00001x} + 123062E^{-00455x} + 6014.87E^{-00021x}$ 합

수와 매우 잘 일치한 결과를 나타내었다. 질량, 방사능 및 발열량이 총량의 0.1 % 이하인 핵종을 제외한 금속전환체에 포함된 34개의 원소를 표 7에 요약.수록하였다. 표 7에서 보는 바와 같이 플루토늄이 전체 방사능의 대부분을 차지하고, 플루토늄, 아메리슘 및 큐륨이 발열량의 대부분을 차지하는 것으로 나타났다. 20 kgHM 산화물 사용후핵연료로부터 금속전환된 금속전환체의 질량, 방사능 및 발열량은 각각 19.76 kgHM, 1,764 Ci 및 4.7 W 이며, 이는 산화물 사용후핵연료 발열량과 방사능의 각각 24.27 %와 24.24 % 이다.

5. 결 론

고온 용융염계에서 산화물 핵연료의 금속전환으로 인한 발열량 및 방사능 준위 감소량의 정량적인 평가와 더불어 각 단위공정별 기준요건의 기초자료 확보를 위해 실험실 규모의 반응성 검증 실험결과와 기 발표된 문헌을 토대로 예상 물질수지를 작성하였고, 이를 기준으로 금속전환체의 발열량과 방사능을 ORIGEN2 코드를 이용하여 계산한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 금속전환체의 시간에 따른 발열량과 방사능은 지수함수로 감소하고, 각각 $y = 98.18E^{-0.072x} + 144.95E^{-0.015x} + 23.18$ 와 $y = 905.35E^{-0.0001x} + 123062E^{-0.0454x} + 6014.87E^{-0.0021x}$ 의 함수와 매우 잘 일치하는 결과를 나타내었다.
- 20 kgHM 산화물 사용후핵연료로부터 금속전환된 금속전환체의 방사능 및 발열량은 1,764 Ci와 4.7 W 이고, 이는 산화물 사용후핵연료 발열량과 방사능의 각각 24.27 %와 24.24 %를 나타내었다

참 고 문 헌

1. E.J. Karell, R.D. Pierce, and T.P. Mulcahey, Treatment of Oxide Spent Nuclear Fuel Using the Lithium Reduction Process, ANL/CMT/CP-89562(1996).
2. M. Fujie, Y. Shoji, and T. Kobayashi, Development of Lithium Process for Reprocessing LWR Spent Fuel, Proceedings of GLOBAL'95, p. 1448 ~ 1453(1995).
3. T. Usami, M. Iizuka, and T. Koyama, Analysis of Reduction Behavior of Oxide Fuels by Lithium Using UO_2 and Simulated Materials, Proceedings of GLOBAL'95, p. 1472 ~ 1477(1995).
4. R. Ahluwalia, and H. Geyer, The GC Computer Code for Flow Sheet Simulation of Pyrochemical Processing of Spent Nuclear Fuels, Nuclear Technology, vol. 116, 180 ~ 195(1996).
5. T. Usami, M. Kurata, T. Inoue and J. Jenkins, Behavior of Actinide Elements in the Lithium Reduction Process(I)-Feasibility of the Li Reduction Process to UO_2 and PuO_2 , T-99089(2000).
6. T. Usami, M. Kurata and T. Kato, Reactions of Rare Earth Oxides in Li Reduction Process and Properties of Products, T-99088(2000).
7. G. Croff, A User's Manual for the ORIGEN2 Computer Code, ORNL/TM-7175(1980).

Table 1. Fuel Reduction Equilibria of AM, AEM and RE Oxides

Element	Chemical Reaction
BaO ₂	BaO ₂ (-1) + 2Li(2) + 2LiCl(1) = BaCl ₂ (1) + 2Li ₂ O(1)
	BaO(-1) + 2LiCl(1) = BaCl ₂ (1) + Li ₂ O(1)
CsO ₂	CsO ₂ (-1) + 3Li(2) + LiCl(1) = CsCl(1) + 2Li ₂ O(1)
Eu ₂ O ₃	Eu ₂ O ₃ (-1) + LiCl(1) = EuOCl(1) + LiEuO ₂ (-1)
Rb ₂ O	Rb ₂ O(-1) + 2LiCl(1) = 2RbCl(1) + Li ₂ O(1)
	RbO ₂ (-1) + 3Li(2) + LiCl(1) = RbCl(1) + 2Li ₂ O(1)
SrO	SrO(-1) + 2LiCl(1) = SrCl ₂ (1) + Li ₂ O(1)
SeO ₂	SeO ₂ (-1) + 6Li(2) = Li ₂ Se(1) + 2Li ₂ O(1)
TeO ₂	TeO ₂ (-1) + 6Li(2) = Li ₂ Te(1) + 2Li ₂ O(1)
CeO ₂	2CeO ₂ (-1) + 3Li(2) = CeO(-1) + 1/2Ce ₂ O ₃ + 3/2 Li ₂ O(1)
Gd ₂ O ₃	Gd ₂ O ₃ (-1) + Li ₂ O(1) = 2LiGdO ₂ (-1)
La ₂ O ₃	La ₂ O ₃ (-1) + LiCl(1) = LaOCl(-1) + LiLaO ₂ (-1)
Nd ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃ (-1) + Li ₂ O(1) = 2LiNdO ₂ (-1)
Pr ₂ O ₃	Pr ₂ O ₃ (-1) + Li ₂ O(1) = 2LiPrO ₂ (-1)
Sm ₂ O ₃	Sm ₂ O ₃ (-1) + Li ₂ O(1) = 2LiSmO ₂ (-1)
Y ₂ O ₃	Y ₂ O ₃ (-1) + Li ₂ O(1) = 2LiYO ₂ (-1)

*phase 1 : LiCl-rich phase

*phase 2 : Li-rich phase

*phase -1 : invariant solids

Table 2. Free Energy of Formation of Rare Earth and Noble Metal Oxides

Oxide	$\Delta G(\text{kJ/mol-O})$	Oxide	$\Delta G(\text{kJ/mol-O})$
CeO ₂	-447.0	NiO	-155.9
Gd ₂ O ₃	-520.7	CdO	-164.3
La ₂ O ₃	-509.8	MoO ₂	-209.9
Nd ₂ O ₃	-515.1	PdO	-19.7
Pr ₂ O ₃	-515.5	Rh ₂ O ₃	-39.1
Sm ₂ O ₃	-517.8	RuO ₂	-74.9
Y ₂ O ₃	-545.6	Sb ₂ O ₃	-154.5
Eu ₂ O ₃	-455.8	SnO ₂	-194.4
Li ₂ O	-480.7	TcO ₂	-133.4

Table 3. Density and Solubility of LiReO₂ in LiCl at 650 °C

Compound	Density (g/cm ³)	Solubility (ppm)	Compound	Density (g/cm ³)	Solubility (ppm)
LiNdO ₂	5.54	3.7	LiLaOCl ₂	4.21	-
LiYO ₂	3.93	-	LiPrO ₂	6.08	-
LiGdO ₂	5.86	0.69	LiSmO ₂	6.21	-

Table 4. Composition of Reference PWR Fuel by Weight

Group	Element (%)						
	Element	U	TRU	AM, AEM Eu, Se, Te	VFP	RE	NM
U	U	95.5					
TRU	Am	8.68x10 ⁻²	Cm	4.96x10 ⁻³	Np	5.36x10 ⁻²	
	Pu	0.847					
AM, AEM Eu, Se, Te	Ba	0.193	Cs	0.23	Eu	1.60x10 ⁻²	
	Rb	3.60x10 ⁻²	Se	5.60x10 ⁻³	Sr	7.90x10 ⁻²	
	Te	4.70x10 ⁻²					
VFP	Br	2.20x10 ⁻³	I	2.40x10 ⁻²	Kr	3.50x10 ⁻²	
	Xe	0.544					
RE	Ce	0.245	Dy	1.00x10 ⁻⁴	Gd	1.40x10 ⁻²	
	La	0.125	Nd	0.412	Pm	7.00x10 ⁻⁴	
	Pr	0.115	Sm	8.60x10 ⁻²	Tb	2.00x10 ⁻⁴	
	Y	4.70x10 ⁻²					
NM	Ag	5.40x10 ⁻³	Cd	9.10x10 ⁻³	Mo	0.345	
	Nb	6.90x10 ⁻⁴	Pd	0.147	Rh	4.20x10 ⁻²	
	Ru	0.219	Sb	9.00x10 ⁻⁴	Sn	4.90x10 ⁻³	
	Tc	8.40x10 ⁻²	Zr	0.372			

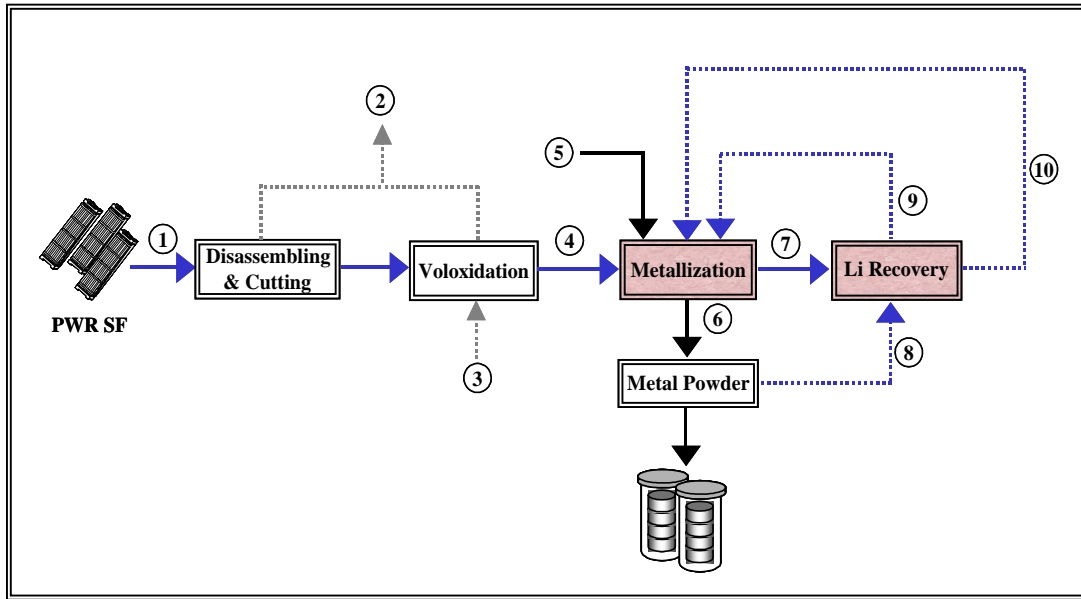


Fig. 1. Flow Sheet of the Advanced Spent Fuel Management Process.

Table 5. Mass Balance of the Advanced Spent Fuel Management Process

구분	핵물질, 반응물질 도입공정					금속전환공정			Li회수공정				
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩			
LiCl					4200		96.6	4103.4	96.6		4200		
Li					460		1.560	66.262	1.560	417.657	21.10		
Li ₂ O							4.490	190.739	4.490		9.511		
O ₂			118										
UO ₂	70.749		U ₃ O ₈	23.583		U	70.678						
					UO ₂	0.071							
TRU	AmO ₂		0.066			Am	0.062						
		CmO ₂			0.004		Am ₂ O ₃	0.004					
							Cm	0.004					
		NpO ₂			0.037			Np	0.036				
							Np ₂ O ₃	0.001					
		PuO ₂			0.620			Pu	0.614				
			Pu ₂ O ₃	0.006									
AM AEM	BaO ₂	0.248		0.248		BaCl ₂	0.006	0.242	0.006		0.248		
	CsO ₂	0.276		0.276		CsCl	0.006	0.270	0.006		0.276		
	Eu ₂ O ₃	0.009		0.009		EuOCl +LiEuO ₂	0.018						
	Rb ₂ O	0.037		0.037		RbCl	0.002	0.072	0.002		0.074		
	SeO ₂	0.013		0.013		Li ₂ Se	0.000	0.013	0.000		0.013		
	SrO	0.159		0.159		SrCl ₂	0.004	0.155	0.004		0.159		
	TeO ₂	0.065		0.065		Li ₂ Te	0.002	0.063	0.002		0.065		
RE	CeO ₂	0.285		0.285		CeO + Ce ₂ O ₃	0.285						
	Gd ₂ O ₃	0.008		0.008		LiGdO ₂	0.016						
	La ₂ O ₃	0.079		0.079		LiLaOCl ₂	0.004	0.154	0.004		0.158		
	Nd ₂ O ₃	0.252		0.252		LiNdO ₂	0.504						
	Pr ₂ O ₃	0.072		0.072		LiPrO ₂	0.144						
	Pm ₂ O ₃	0.000		0.000		PmCl ₂	0.000	0.000	0.000		0.000		
	Sm ₂ O ₃	0.050		0.050		LiSmO ₂	0.100						
	TbO ₂	0.000		0.000		TbO ₂	0.000						
Y ₂ O ₃	0.047		0.047		LiYO ₂	0.094							
VPS	Kr	0.074	0.074										
	Br	0.002	0.002										
	I ₂	0.017	0.017										
	Xe	0.731	0.731										
NM	Ag ₂ O	0.004		0.004		Ag	0.008						
	CdO	0.014		0.014		Cd	0.014						
	MoO ₂	0.634		0.634		Mo	0.634						
	PdO	0.244		0.244		Pd	0.244						
	Rh ₂ O ₃	0.036		0.036		Rh	0.072						
	RuO ₂	0.382		0.382		Ru	0.382						
	Sb ₂ O ₃	0.001		0.001		Sb	0.002						
	SnO ₂	0.007		0.007		Sn	0.007						
	TcO ₂	0.150		0.150		Tc	0.150						
ZrO ₂	0.731		0.731		Zr	0.719							

Table 6. Mass, Radioactivity and Thermal Power of Elements Removed in the Advanced Spent Fuel Management Process

Nuclide	Radioactivity		Thermal Power	
	Ci	%	W	%
Te	2.78E+02	9.36E-02	0.23	2.73E-02
Se	0.41	1.38E-04	1.02E-04	1.20E-05
Br	0.00	0.00	0.00	0.00
Kr	4.90E+03	1.7	7.3	0.86
Rb	2.16E-05	7.26E-09	1.80E-08	2.11E-09
Sr	5.78E+04	19.	67.	7.9
Y	5.78E+04	19.	3.21E+02	38.
I	3.16E-02	1.06E-05	1.46E-05	1.71E-06
Xe	2.91E-32	9.79E-36	5.33E-35	6.24E-36
Cs	8.84E+04	30.	1.48E+02	17.
Ba	7.83E+04	26.	3.08E+02	36.
Pm	9.36E+03	3.2	3.4	0.39
Total	2.97E+05	1.00E+02	8.54E+02	1.00E+02
Total/SF	75.7557		75.7345	

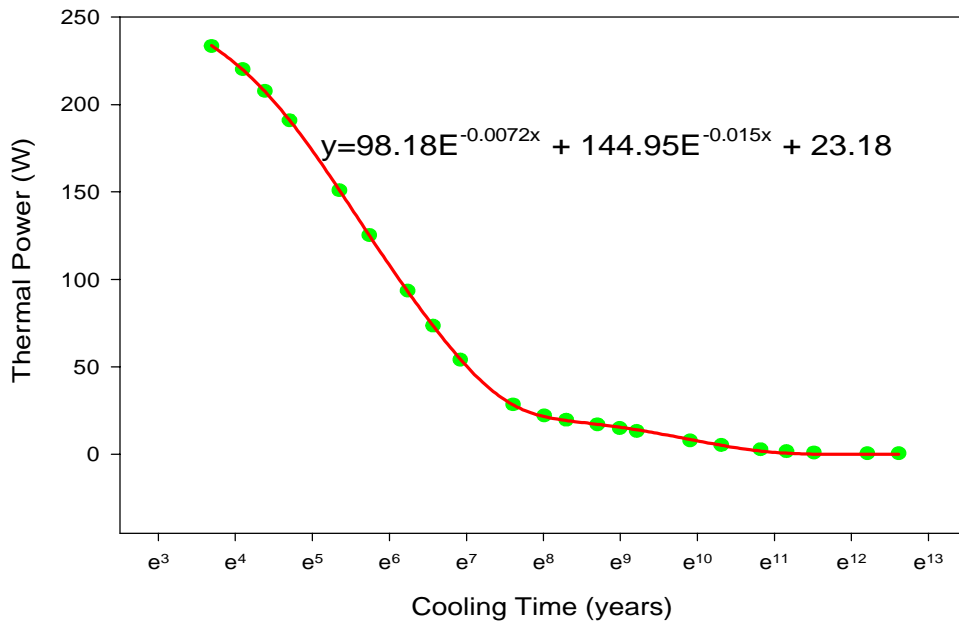


Fig. 2. Thermal Power of a Reduced Metal Ingot as a Function of Cooling Time.

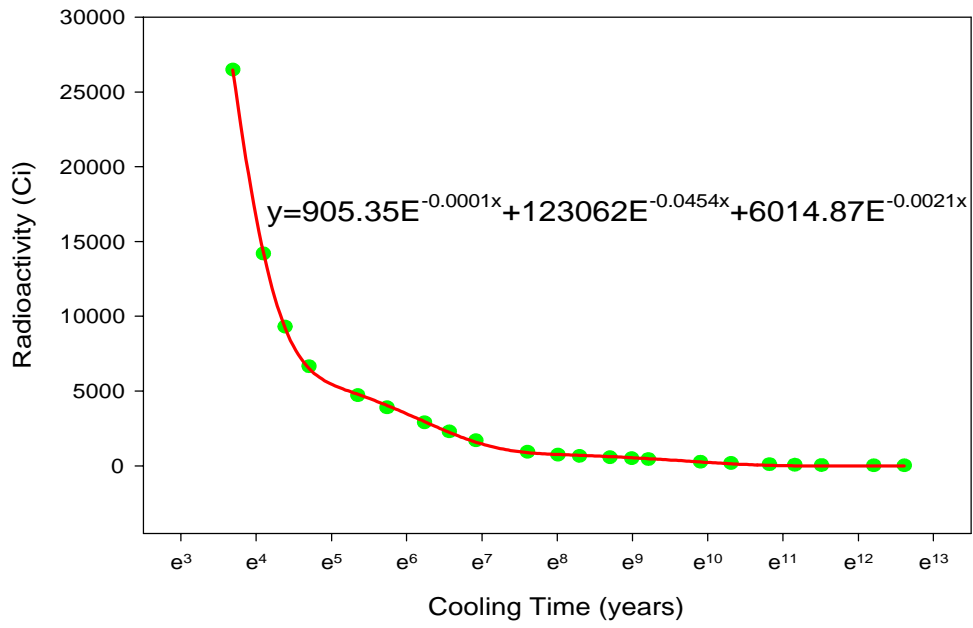


Fig. 3. Radioactivity of a Reduced Metal Ingot as a Function of Cooling Time.

Table 7. Mass, Radioactivity and Thermal Power of Elements Included
in a Reduced Metal Ingot

Nuclide	Radioactivity		Thermal Power	
	Ci	%	W	%
H	3.12E+02	0.33	1.05E-02	3.84E-03
C	0.57	5.98E-04	1.67E-04	6.09E-05
N	0.00	0.00	0.00	0.00
F	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.00	0.00	0.00	0.00
Al	0.00	0.00	0.00	0.00
Si	1.95E-08	2.05E-11	2.42E-11	8.85E-12
P	1.95E-08	2.05E-11	1.97E-10	7.21E-11
Fe	0.69	7.22E-04	2.32E-05	8.47E-06
Co	43.	4.54E-02	0.67	0.24
Ni	1.6	1.63E-03	1.56E-04	5.69E-05
Zn	0.00	0.00	0.00	0.00
Zr	1.8	1.92E-03	2.12E-04	7.74E-05
Mo	0.00	0.00	0.00	0.00
Tc	13.	1.40E-02	6.66E-03	2.43E-03
Ru	5.50E+02	0.58	3.27E-02	1.19E-02
Pd	0.11	1.18E-04	6.67E-06	2.44E-06
Ag	0.16	1.71E-04	2.69E-03	9.83E-04
Cd	34.	3.56E-02	5.70E-02	2.08E-02
Sn	0.95	1.00E-03	1.32E-03	4.82E-04
Sb	1.14E+03	1.2	3.6	1.3
Eu	5.62E+03	5.9	38.	14.
Gd	3.64E-04	3.83E-07	3.29E-07	1.20E-07
U	3.7	3.91E-03	5.30E-02	1.94E-02
Np	20.	2.06E-02	5.71E-02	2.09E-02
Pu	8.27E+04	87.	1.10E+02	40.
Am	1.80E+03	1.9	59.	21.
Cm	1.61E+03	1.7	56.	21.
Rh	5.50E+02	0.58	5.3	1.9
La	1.11E-10	1.17E-13	8.15E-13	2.98E-13
Ce	1.49E+02	0.16	9.88E-02	3.61E-02
Pr	1.51E+02	0.16	1.1	0.40
Nd	1.57E-09	1.66E-12	0.00	0.00
Sm	3.50E+02	0.37	4.10E-02	1.50E-02
Total	9.50E+04	1.00E+02	2.74E+02	1.00E+02
Ratio	24.2444		24.2655	