

플루토늄을 우라늄과 함께 轉換하는 混合轉換法은 核非擴散을 具現하기 위한 技術의 成果인데, 여기서는 주로 일본에서의 技術을 說明하면서 플루토늄혼합전환연료의 개발과 이용 상황에 대해 소개한다.

플루토늄混合轉換燃料의開發

1. 混合轉換—平和利用과 核非擴散의 兩立

日本動燃事業團의 東海處理工場에서 회수되는 플루토늄은 窒酸플루토늄이기 때문에 이것을 다시 연료로 이용하려면 酸化物로 轉換시켜야 한다. 이 process는 핵연료사이클을 完結시켜 우라늄자원의 有效利用을 도모함에 있어서 불가결한 것이다. 재처리공장과 인접하여 현재 轉換 시설의 建設이 進行되고 있으나 여기서는 플루토늄을 우라늄과 함께 轉換하는 혼합轉換process가 채택되고 있다. 이것은 核擴散抵抗性을 높이기 위한 조치로서 핵비확산정책을 具現하기 위한 하나의 技術적 성과이다.

일본의 혼합轉換법 개발의 역사는 1977년부터이다. 직접 계기가 된 것은 재처리공장 운전 개시에 관한 美·日 양국의 정부교섭이었다. 세계적인 핵비확산에 대한 의식고조와 평화이용을 兩立시키기 위해 혼합轉換법이 모색되었다. 개발의 대상이 된 것은 암모니아共沈澱法, 流動床 직접탈窒法 및 COPRECAL法이다.

그런데 각 방법에는 각각의 難點이 있었기 때문에(表 1) 일본動燃에서는 東海事業所 플루토늄 燃料部에서 1977년 11월부터 혼합轉換技術 확립을 위한 개발연구를 실시하여 마이크로波 가열 직접탈窒법이라는 전혀 새로운 혼합轉換 기술 개발을 행하였다. 이 방법은 질산플루토늄과 질산우라닐의 혼합용액에 마이크로波를 照射하므로써 간단하게 가열·탈질을 해서 혼합산화물을 얻는 것으로 process가 매우 간단하다는 큰

특징을 가지고 있다.

기술개발의 경위를 살펴보면 암모니아共沈澱法 및 마이크로波 加熱脫窒法에 대해서는 工學 규모의 R&D 설비를 플루토늄연료부내에 설치하였고, 流動床 직접탈窒法에 대해서는 국내 maker에 委託하여 각각 우라늄 시험을 행하여 그 결과를 검토해서 최종적인 방식을 결정하기로 했다.

또, COPRECAL法에 대해서는 미국과의 연구 중복을 피해 미국에너지부(DOE)으로 부터의 정보를 판단의 자료로 하고 있다.

이상의 검토 결과, 플루토늄을 취급한다는 상황을 배경으로 했을 때의 공정의 간이성이 평가되어 마이크로波 가열 직접탈窒法을 혼합轉換 시설의 process로 채택하기로 결정했다. 이와 함께 새로 플루토늄연료부내에 플루토늄시험을 위한 공학시험설비를 갖추고 그 결과를 혼합轉換 시설의 설계에 반영하기로 했다. 현재, 혼합轉換 시설은 건물건설이 거의 완성되어서 通水作動 시험을 거쳐 금년 말에는 마이크로波 가열 직접탈窒法에 의한 플루토늄과 우라늄의 혼합분말을 생산할 것이 기대되고 있다.

2. 마이크로波 加熱直接脫窒法에 의한 混合轉換

(1) 脫窒試驗設備

그림 1에 脫窒시험장치를 나타내었다.

질산우라닐(uranyl nitrate)의 열분해는 발생

表 1 혼합전환기술 개발단계에서의 각종방식의 평가

혼합전환방식	특 징	문 제 점
암모니아共沈澱法	질산 플루토늄- 질산우라닐 혼합용액에 암모니아를 가해서 생성되는 침전물을 여과, 건조,焙燒하여 혼합산화물 분말로 한다.	廢液이 多量으로 발생. 침전물의 여과성에 개선의 여지. 工程이 길다.
流動床直接脫室方式	질산플루토늄-질산우라닐 혼합용액을 노즐로부터 高溫가스流中에 분무하여 직접 산화물분말로 한다. 제트밀로 미분쇄한 분말은 成型加工 양호.	工學的으로 기술에 불안정 요소가 많다(운전개시시의 조건설정이 미묘, 노즐孔의 폐쇄 등).
COPRECAL法	암모니아共沈澱法과 流動床직접탈질법의 결합. GE의 기술. 분말특성 양호.	공학적으로 미완성.
마이크로波加熱 直接脫室法	질산플루토늄- 질산우라닐 혼합용액을 電子렌지(마이크로波加熱)로 가열, 침전물을 거치지 않고 혼합산화물로 한다. 일본서 개발한 기술. 암모니아共沈澱法에 비해 工程-조작이 간단. 얻어진 분말은 燒結性이 극히 양호하며 플루토늄 스폿도 볼 수 없었다.	대량생산성의 實証이 미완료.
(참고) 碳酸 침전법	질산플루토늄 용액에 碳酸을 가하여 생성되는 침전물을 여과,焙燒하여 산화물 분말로 한다. 종래의 전환기술.	單體轉換法으로 핵비확산에 문제가 있다.

하는 NOX가스에 의해 용액이 팽창된 상태에서 진행되므로 탈질생성물은 스펀지狀으로 얻어진다. 따라서 그 부피密度가 낮으며 脫室容器로부터 추출해 내는 것도 용이하다. 또 탈질반응에서 발생하는 질산가스와 NOX가스는 펌프에 의해 排氣되며 응축기와 scraper에 유도되어 포집된다. 여기서 문제가 되는 것은 이와같이 해서 만들어진 분말의 특성인데 이 우라늄 시험에서 만들어진 3산화우라늄을 환원해서 얻어지는 2산화우라늄 분말은 양호한 燒結特性을 나타내며 펠렛成型에 적당한 원료임이 확인되었다.

(2) 混合轉換試驗設備

우라늄에 의한 양호한 결과와 process의 간단함 때문에 마이크로波 가열탈질법을 혼합전환 시설로 채택하기로 했는데 이에 앞서서 공학시험설비를 만들어서 플루토늄시험을 하기로 하였다. 이 시험설비는 78년 1월에 설계·제작이 시작되어 플루토늄연료부내에 설치되었고 79년 8월 이후부터 공학시험이 계속되고 있다.

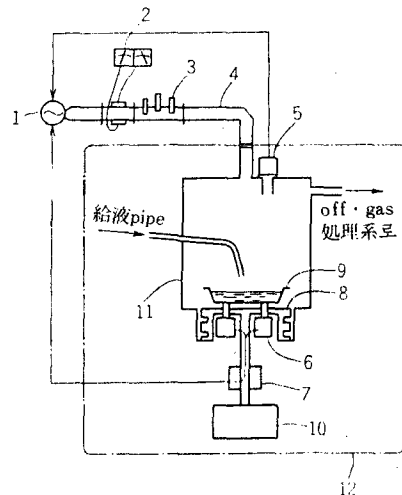


그림 1 micro波 脫室試驗裝置
(構成要素: 1. micro波發振器, 2. power motor, 3. turner, 4. WG, 5. 照度檢出器, 6. load cell, 7. slip ring, 8. turn table, 9. 脫室竈, 10. 驅動裝置, 11. micro波 oven, 12. glove box.)

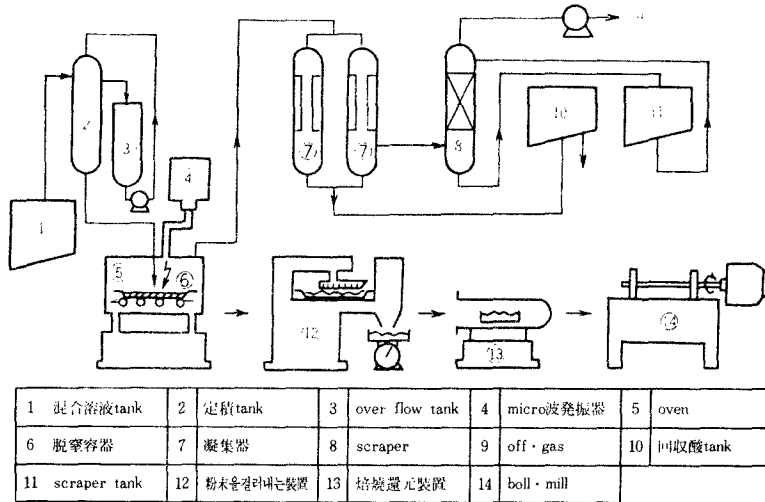


그림 2 混合轉換플루토늄 混合轉換工學試驗設備의 flow diagram

그림 2에 그 구성을 나타내었다.

재처리공장에서 운반된 질산플루토늄 용액은 혼합용액탱크(160ℓ×2개)에서 질산우라닐과 所定의 비율로 혼합조정되어 計積탱크에 유도되며 一定容積(약 7.2ℓ)만이 oven중의 脫室容器(내경 55cm, 깊이 5cm)로 給液된다. 마이크로波의 印加에 의해 脫室이 행해진 후 脫室生成物은 냉각되고 분말을 걸러내는 장치에 의해 자동적으로 탈질용기로부터 꺼내져서 焙燒환원장치나 분쇄장치에 의해 펠렛제조에 적당한 분말로 調整된다.

혼합용액중의 Pu/U比에 대응해서 마이크로波의 印加出力을 바꾸는 몇가지의 탈질시험을 해본 결과 모든 경우에서 얻어진 분말펠렛의 燒結性은 양호하였다. 이 설비의 능력은 2kgMOX/日이며 그 후 Pu/U比 1:1로 長期實証 試驗을 계속하고 있다. 그 결과 매년 160kg의 플루토늄(MOX 360kg)을 전환하고 있으며 82년 4월말까지의 전환플루토늄은 340kg에 달하고 있다. 그동안 사소한 고장도 없이 순조롭게 가동을 계속하여 process로서의 신뢰성은 거의 實証되었다고 생각하고 있다.

(3) 마이크로波 加熱法에 관한 앞으로의 R&D 플루토늄과 같이 인간으로부터 격리된 환경에서 취급해야만 할 때 가장 중요한 것은 취급하는 기구의 신뢰성이다. 이점에서 마이크로波가

열법은 원리나 구조가 간단한 만큼 충분한 신뢰성이 있으며 훌륭한 방법이라고 할 수 있다. 또 臨界制御라는 플루토늄 特有의 장치조건을 고려했을 때도 플루토늄이 접시의 바닥에서 움직이지 않는 상태로 酸化物로 변하는 마이크로波가 열법은 침전으로서 농도의 변화를 고려해야 하는 침전法이나 안개모양으로 空間에 퍼지는 流動床法에 비하면 장치의 설계상 유리한 면도 있다. 장치의 신뢰성이 높고 臨界設計를 쉽게 할 수 있다는 것은 그만큼 대량처리를 위한 장치로 만들기 쉽다는 것이다.

마이크로波 轉換法에 관한 앞으로의 R&D 과제에는 두가지가 있다. 하나는 효율을 향상시키는 것이고 다른 하나는 우라늄전환에로의 응용이다. 효율향상을 목적으로 현재 maker에 위탁하여 장치의 連續化와 脫室容器의 재료를 검토하고 있다. 연속화에 대해서는 mockup 장치를 만들어서 cold시험이나 우라늄시험을 행하고 있다. 또, 탈질용기에 대해서는 현재 stainless steel을 사용하고 있으나 이 재질은 마이크로波가 통하지 않기 때문에 開口部에서 入射되는 마이크로波 밖에 奇與하지 못하고 있다. 그러나, 재질을 마이크로波가 통하는 ceramic으로 바꿀 수 있으면 효율은 2배로 향상될 것이다. 현재 여러가지의 ceramic으로 탈질용기를 試作해서 능

력시험이나 強度시험, 나아가서는 용기로부터의 不純物 浸出 등에 대해 시험을 하고 있다. 재질의 문제가 해결되면 脫窒容器체로 脫窒生成物を 다음의 焙燒還元炉로 보내서 粉末特性的의 調整을 할 수 있다.

마이크로波 加熱脫窒法의 적용분야에서도 다른 가능성은 재처리에서 回收우라늄의 2산화우라늄으로의 전환이다.

마이크로波 가열법에서는 미량의 불순물이 모두 제품쪽으로 들어가버리기 때문에 排氣나 排液에 대해서도 전혀 문제가 없다. 전환시설이 재처리공장에서 떨어져 있을 때는 3산화우라늄을 再溶解하는 것이 좋다. 질산우라늄을 운반해 오면 부산물로 발생하는 질산의 처리가 큰 문제다. 이러한 점에서 3산화우라늄은 운반도 쉬우며 질산은 closed cycle을 시키면 된다. 우라늄을 전환할 때는 플루토늄에서와 같은 臨界의 문제가 없으므로 기계설계를 자유롭게 할 수 있으나 기본적인 과제는 市販되는 發振器를 얼마만큼 大型化 시킬 수 있으며 또 효율을 향상시키는 것이 가능한가 하는 점이다.

3. 混合轉換燃料의 利用

(1) 混合轉換實証試驗

日本動燃에서의 본격적인 혼합전환은 건설중인 전환시설이 운전에 들어가는 83년 초가 될 것이나 이에 앞서서 현재 플루토늄연료부내에서 79년 9월 이후부터 工學시험설비를 이용해서 혼합전환의 實証시험이 계속되어 왔다. 82년 4월 말까지의 累積轉換量은 MOX로 773kg에 달하고 있다.

혼합전환연료를 연료가공의 원료로 이용할 때에 고려해야 할 요건이 몇가지 있는데 가장 중요한 因子는 플루토늄과 우라늄의 混合比이다. 연료를 가공할 때 이 혼합전환연료에 우라늄을 혼합하므로써 플루토늄과 우라늄의 혼합율을 최종적으로 조정한다. 혼합전환연료에서는 플루토늄의 비율이 높은 쪽이 그 후의 이용에 일반성이 있게 된다. 현재의 實証시험에서의 이 비율

은 1:1로 되어 있다. 이것은 FBR에 이용할 수 있게 하기 위해서는 플루토늄이 많은 쪽이 좋다는 기술적인 배려와 핵확산저항성을 강하게 하기 위해서는 우라늄이 많은 쪽이 좋다는 정치적인 배려의 balance로 결정된 것이다.

두번째 요건은 플루토늄과 우라늄의 同位元素組成比가 어느정도 크기의 badge까지 균일하게 되는가 하는 것이다. 이것은 혼합전환 경우만의 문제가 아니고 單體轉換에서도 본질적으로는 같은 문제가 있기는 하나 혼합전환의 경우는 우라늄이 붙는 量만큼 복잡해진다. 플루토늄동위원소 조성비는 재처리에서의 플루토늄용액 최종 저장탱크 용량과 여기에서의 플루토늄 抽出 운전조건으로 결정된다.

세번째 요건은 불순물이다. 마이크로波 加熱直接脫窒法은 용액중의 불순물 모두가 그대로 제품중에 남는다. 마이크로波 가열법에 의한 전환분말의 불순물분석 예를 表2에 나타내었다. 혼합전환분말 그 자체에는 연료仕樣을 넘는 원소가 몇가지 있으나 연료가공 단계에서 우라늄

表2 micro波 脫窒生成物中の 不純物

不純物	* 1) Pu-U混合轉換粉	回收U粉	FUGEN燃料仕樣	JOYO燃料仕樣
Ag	< 5 ppm	< 0.2	< 10	* 3
Al	< 100	< 10	< 400	< 500
B	< 5	0.2	< 1	< 20
Cd	< 5	< 0.5	< 1	< 20
Cr	290	2	< 200	< 500
Cu	< 10	< 1	< 50	* 2
Fe	1200	13	< 500	< 800
Mg	110	3	< 100	< 25
Mn	< 50	< 1	—	* 3
Ni	140	< 4	< 300	< 500
Si	100	< 6	< 400	* 2
V	< 50	< 5	—	< 500
Zn	< 100	< 20	—	* 2
Ti	—	—	—	—
Mo	< 50	< 2	< 300	* 3
Pb	< 50	< 2	< 100	* 3
Sh	< 30	< 2	< 20	* 3
Ca	< 50	3	< 200	< 80
C	140	< 100	< 200	< 150
F	< 10	< 25	< 25	< 25
Cl	< 10	< 25	< 25	< 25
N	< 50	—	< 200	< 200

* 1) 天然u

* 2) Cu+Zn+Si<700
* 3) Ag+Mn+Mo+Pb+Su<200

과 혼합하므로써 묶어지므로 문제가 되지 않는다.

(2) ATR에서의 混合燃料 利用

혼합전환의 實証시험에서 얻어지는 혼합전환 연료는 현재 ATR原型炉(FUGEN)의 교환연료로 제공되고 있다. 79년 10월부터 81년 10월까지 133kg Pufiss를 사용하고 72体の 연료집합체를 제조하였다(MOX로 약 10톤). 이 중 44체는 81년 4월에 원자로에 裝填되어 순조롭게 운전을 계속하고 있다. 앞으로 「FUGEN」에서 사용하는 플루토늄연료는 모두 혼합전환연료로 충당할 예정이다.

혼합전환연료의 플루토늄同位元素組成은 재처리에서의 플루토늄 저장badge에 의해 변동이 있다. 이 badge size와 원자로가 요구하는 교환연료의 badge size는 일치되지 않으므로 교환연료의 badge속에서 플루토늄의 富化率에 차이가 생기게 된다. 따라서 연료설계상에서는 플루토늄의 부화율이 동위원소조성 차이에 의해 다소 변동하더라도 容認하고 있다. 「FUGEN」의 경우에는 炉가 작으므로 교환연료의 badge size가 크지 않으나, 60만KW급의 ATR實証炉가 되면 교환badge는 상당히 커진다.

(3) FBR에서의 混合燃料 利用

현재, FBR연료로 일본에서 가공되고 있는 것은 「JOYO」 연료 뿐이나 여기에는 혼합연료가 사용되고 있지 않다. 「JOYO」는 높은 高速中性子束을 발생시키기 위한 研究炉이기 때문에 分裂性元素의 富化를 높게 한 연료가 요구된다. 한편, 연료제조상의 이유로 플루토늄의 富化度は 30%가 上限이므로 分裂性元素가 부족한 경우에는 농축우라늄을 사용하게 된다. 「JOYO」의 경우는 이와같은 이유의 12%의 농축우라늄이 사용되고 있다.

플루토늄 공급상황을 고려할 때 세계적으로 안정되어 있다고 하기는 어렵다. 가장 믿을 수 있는 것은 自國플루토늄이므로 일본은 「JOYO」에 대해서도 혼합전환연료의 이용방법을 강구해야 한다고 하고 있다. 그러나 現行의 천연우라늄과의 1:1 전환연료와 12% 농축우라늄과는

어떠한 組合을 하더라도 현재의 연료만큼 分裂性同位元素富化率을 유지시킬 수 없으므로 혼합연료를 「JOYO」에 이용하기 위해서는 기술적으로 또한 정책적으로 다시 검토해야 할 것이지만, 發電과 우라늄자원의 유효이용을 목적으로 한 高速炉에서는 現行의 혼합전환연료가 문제점이 사용될 수 있을 것이 명백하다. 이 때, 연료 정책에 따라 농축테일의 劣化우라늄과 혼합전환하게 될 것이다.

4. 西獨에서의 混合轉換燃料 開發

질산플루토늄의 전환은 재처리와 관련되는 문제로써 반드시 다음단계를 고려해야만 하는데 이것을 혼합전환이라는 형태로 기술개발하고 있는 나라는 현재 일본과 서독 뿐이다. 서독에서 얻어지는 질산플루토늄은 WAK라고 하는 實証試驗規模 再處理工場에서 추출되는 것이 유일한 것이며 선택된 방식은 A(U/Pu)C法 이라고 불려지는 共沈澱法이다.

일반적으로 질산용액상태에서 플루토늄은 4價 이온, 우라늄은 우라닐이온 상태로 있으며 그 대대로는 양쪽이 함께 침전하지 않는다. 따라서 플루토늄을 6價로 산화시켜(질산용액을 가열) 탄산가스과 암모니아를 첨가해서 혼합산화물을 만든다. 이 방식이 채택될 때까지는 다음과 같은 要件이 조건으로 검토되었다.

- dust가 나지 않을 것
- 아메리슘의 분리가 가능할 것
- 가공된 연료체가 충분히 질산에 녹을 것
- 核拡散抵抗性이 있을 것

서독에서는 이 방법으로 연료봉을 5本試作하여 80년 4월에 KW0원자로에 裝填하였다. 그러나, 이들은 아직 실험실단계이며 이 경험에서부터 대규모인 工業적단계로 옮겨질 때까지는 광범위에 걸친 연구개발을 행할 필요가 있다고 하고 있다. 한편, badge 사이에서 플루토늄의 同位元素組成이 고르지 못한 문제는 대량의 플루토늄연료 제조경험속에서 하나의 방법에 의해 통합되어 왔다. 그것은 플루토늄-239와의 等価係數(AF)를 구해서 플루토늄의 富化度를 결정

하는 방법이다. 즉, $AF = \sum_i AF_i \cdot Pu_i$. 여기서 Pu_i 는 각 동위원소의 원자수 비율이고 等價係數 AF_i 는 핵실험에서 결정된다. 일반적으로 Pu-238 및 Pu-240, Pu-242에 대해서 AF_i 는 1보다 작고, Pu-239는 1, Pu-241은 1 이상이다.

AF는 각각의 플루토늄 badge에 대해서 결정되거나 AF의 값이 一定한 公差에 들어가는 badge는 하나의 그룹에 흡수되어 하나의 값으로 통일된다. 서독에서는 이 방법으로 KFK-II와 plu-thermal의 연료가 만들어져 왔다.

放射線과 健康影響

UN科學委員會 1982年 報告書

「原子放射線의 영향에 관한 UN科學委員會」(UNSCEAR)는 최근 1982년 보고서를 정리했다. UN과학위원회의 보고서는 환경중의 放射性物質水準, 방사선의 신체적·유전적 영향 및 방사선의 危險度에 관한 가장 包括的인 報告書로 평가받고 있다. 이번 보고서는 77년의 報告書이후 5년만에 나온 것으로서 最新 데이터를 수록하고 있다.

SI單位와 実効線量當量을 導入

1982년 보고서는 UN총회에 제출되는 本文과 여기에 附屬되는 從屬文으로 되어 있다. 本文은 附屬書 內容을 알기쉽게 정리한 것이고 附屬書는 전문적인 기술내용이다.

부속서의 내용은 다음의 각 章으로 구성되어 있다.

- A. 線量評價모델
- B. 自然放射線源에 의한 被曝
- C. 人爲的으로 변경된 자연방사선피폭
- D. Rn, thoron과 딸核種에 의한 피폭
- E. 핵실험에 의한 피폭
- F. 원자력발전에 의한 피폭
- G. 醫療上의 피폭
- H. 職業上의 피폭
- I. 방사선의 유전적영향
- J. 照射에 의한 정상조직의 非確率的 影響

K. 방사선에 의한 수명의 단축

L. 방사선과 물리적, 화학적, 생물적 여러因子的 組合에 의한 생물학적 영향

이들 내용에서 중요한 것들을 요약하면 다음과 같다.

77년의 보고서와 기본적으로 다른 사항은 SI單位와 実効線量當量 導入이다.

SI단위 도입에 의해서 방사능은 becquerel (Bq, 27 pCi에 상당)로 표시되며 흡수선량과 선량당량은 각각 gray (Gy, 100rad)와 sievert (Sv, 100rem)로 표시되었다. 또, 실효선량당량 도입에 의해서 지금까지 主要臟器의 선량, 예를 들면 뼈, 골수, 갑상선, 肺, 생식선 등 각 기관의 피폭선량을 모아서 정리했던 것을 이번 보고서에서는 다시 실효선량당량도 계산해서 정리하였다. 이것은 ICRP 방식에 따라서 각 臟器의 선량에 각각의 荷重係數를 곱해서 加算한 것으로 全身等價線量이라고 할 수 있는 것이다.