

# 레이저法우라늄濃縮의 現況과 展望

— 日本의 레이저法 技術開發을 中心으로 —

## 1. 序 言

1987년 1 월을 목표로 「레이저法우라늄濃縮技術研究組合」이 日本電氣事業連合會에 의해서 설립되었다. 이에 따라 日本에서도 레이저法우라늄濃縮의 연구가 本格化하고 있다. 이 설립은 日本原子力委員會우라늄濃縮懇談會에 설치된 Working Group의 報告書에 따른 民間活動의 一環이라 하겠다.

물론 日本原子力委員會의 레이저法에 대한 見解는 1985년 6 월에 발표된 美國에너지省(DOE)의 우라늄농축에 대한 新戰略의 발표와 無關한 것은 아니다. 미국은 開發中인 遠心法우라늄농축계획을 폐기하고 레이저法우라늄농축을 次期우라늄농축법으로 채택하기로 결정했다. 이 1985년의 결정은 1982년에 행해진 AIS(Advanced Isotope Separation)계획의 check and review에서의 原子法에 대한 평가와 그후 原子法の 進展狀況에 立脚한 것이다. 또한 프랑스나 西獨의 레이저法에 대한 정책도 미국의 우라늄濃縮戰略을 기초로 한 것이다.

本稿에서는 레이저法の 進進상황과 각국의 對應, 動向에 대해서 現況을 紹介코자 한다.

## 2. 레이저法이 注目받게 된 背景

현재 商業用發電爐의 主流가 되고 있는 輕水爐를 사용하는 우라늄농축은 核燃料사이클에서 필수의 工程이다. 1974년 時點에서 自由世界中 우라늄濃縮役務는 미국의 DOE에 의해서 獨占되고 있었다. 그러나 1974년부터 1980年初

에 걸쳐 유럽이 市場에 參加하게 되었다. Eurodif는 가스擴散法으로, 또한 Urenco는 독자로 개발한 遠心法の 工場을 차례로 建設했기 때문에 1985년에는 미국DOE의 市場占有率이 50%이하로 까지 하락했다. 유럽이외에서는 일본을 위시하여 南阿, 브라질 등도 독자의 우라늄농축사업계획을 추진하였다.

이와 같이 각국이 독자의 농축사업을 하게 된 배경에는 核燃料사이클에서 不可欠의 工程인 우라늄농축사업이 미국에 獨점되어 에너지安全確保의 觀點에서 바람직하지 못하다고 판단되었기 때문으로 보여진다. 우라늄농축법이 가스擴散法에서 遠心法으로, 다시 레이저法으로 進進해 나갈 것으로 전망하고 각국 모두 새로운 기술의 개발에 힘을 기울이고 있는 것도 오로지 新技術에 의한 한나라의 市場再獨占을 두려워하기 때문이다.

한편 그동안 농축우라늄의 수요전망에 큰 錯誤가 생겼다. 그 원인은 프랑스와 일본을 제외한 각국에서 원자력발전소의 建設이 극히 低調했기 때문이다. 이로써 1974년 時點에서 年間 15萬톤SWU로 예측되었던 2000년도의 우라늄濃縮役務展望이 1985년에는 年間 2萬톤SWU이하로 대폭 下向修正되게 되었다. 그런데 미국에서는 1950년대에 建設된 가스擴散工場을 1970년대에 改량하여 今世期末까지 충분히 공급할 수 있는 대책을 이미 실시해 왔다. 반면 美國의 遠心法은 1985년 시점에서는 아직 개발단계에 있었고, 遠心機의 수명이나 성능에 문제가 남

아 있었다. 따라서 1985년 6월에 미국 DOE가 遠心法의 개발을 중지하고 레이저법을 次期濃縮方法으로 결정한 배경에는 다음과 같은 판단이 있었다고 생각된다.

먼저 유럽勢의 參加에 의해 붕괴된 濃縮事業의 獨占體制를 회복하기 위해서는 보다 값이 싼 濃축우라늄을 공급할 수 있는 新技術에 의해야만 한다. 그런데 美國의 遠心法은 多額의 投資를 했음에도 불구하고 아직 개발단계에 있고, 세계적으로 濃축우라늄은 당분간 공급과잉상태가 계속될 것으로 예상된다. 따라서 미국은 금세기말까지 既存의 氣擴散플랜트에 의존하면서 研究開發費를 레이저법에 집중시킴으로써 레이저법을 實用化하여 市場占有率의 회복을 도모할 시간적 여유가 있게 된다. 또 原子法레이저우라늄濃縮은 軍事利用을 목적으로 한 플루토늄의 同位元素分離에도 이용할 수가 있으므로 미국으로서는 기술적인 重複性이 크다는 이점도 있다.

이상과 같은 이유로 1985년 미국DOE의 결정이 있었던 것으로 보여지는데, 물론 原子法을 위시한 레이저法 自體의 눈부신 발전이 이와 같은 결정을 가능하게 했다는 것은 말할나위도 없다. 그래서 다음에 레이저法の 발전을 알아보기로 한다.

### 3. 레이저法の 進展

#### 3.1 1982年 美國에너지省의 決定

레이저가 1960년 발견된 직후부터 레이저光의 單色性(언어지는 빛의 波長領域이 극히 좁은 범위에 한정되는 성질)을 이용해서 同位元素를 분리하려는 試圖가 시작되었다. 레이저에 의한 濃축우라늄同位元素分離의 연구가 본격적으로 시작된 것은 1970年初이다. 金屬우라늄을 가열해서 증발시켜 可視域의 레이저光에 의해서 U-235를 선택적으로 이온化하여 電極에 부착시키는 방법을 原子法이라고 한다. 原子法에 의한 濃축우라늄은 미국의 Lawrence Livermore

國立研究所(LLNL)에 의해서 추진되었다. LLNL에서의 原子法 연구는 그후 순조로운 발전을 하여 1974년에는 商業發電用 原子爐에서 필요로 하는 濃度의 濃축우라늄을 밀리그램정도 얻는데 성공했다. 原子法에서는 濃축우라늄勵起用 레이저로 波長可變性이 우수한 色素레이저를 사용할 수 있었으므로 연구의 초기단계에서 이 방법의 原理實證에 착수할 수 있었다. 이 방법에서는 濃축우라늄이 이온으로 얻어지므로 質量分析計에 直結해서 On-line으로 소규모 실험의 분석이 행해졌다. 質量分析計의 이온化室 대신에 레이저를 사용함으로써 초기의 실험을 할 수 있었다는 것이 原子法の 原理實證을 쉽게 할 수 있었다.

原子法이 工業的인 프로세스로의 가능성을 보이기 시작한 것은 다음의 두가지 기술적인 breakthrough가 달성되었기 때문이다. 먼저, 色素레이저의 勵起用 레이저로 YAG레이저 등을 대신하여 銅蒸氣레이저(CVL)가 개발된 것을 들 수 있다. 銅의 蒸氣에 Ne를 첨가하면 準安定狀態에 있는 銅原子가 높은 效率로 脫勵起되는 것을 발견하고 CVL은 原子法의 勵起用 레이저로 확고한 평가를 받게 되었다. 또 濃축우라늄의 蒸氣發生法으로 종래의 joule加熱方式에서 電子beam加熱方式으로 轉換할 수 있었던 것도 또 하나의 중요한 요인이었다. 原子法에서는 濃축우라늄금속을 2,500K이상으로 가열하여 증발시킬 필요가 있기 때문에 효율이 높은 加熱法の 개발이 매우 중요하기 때문이다.

한편 UF<sub>6</sub>가스에 赤外레이저를 照射하여 U-235F<sub>6</sub>를 선택적으로 분해하여 固體生成物 UF<sub>6</sub>에 U-235를 濃축하는 방법을 分子法이라고 한다. 1970년 초부터 1982년까지 分子法은 미국의 Los Alamos國立研究所(LANL)에서 검토되었고, 1976년에는 分子法에 의해서 低濃축우라늄이 밀리그램정도 얻어졌다. 分子法은 氣擴散法이나 遠心法 등에서 사용하고 있는 UF<sub>6</sub>가스를 사용한다. UF<sub>6</sub>는 化學的으로 安定하며 物性이 잘

알려진 물질로 核燃料사이클에서 이미 UF<sub>6</sub>를 사용한 우라늄濃縮工程이 확립되어 있는 것을 고려하면 가능하다면 이 UF<sub>6</sub>를 사용한 레이저法の 成立이 바람직하다. 그러나 1982년 미국 DOE의 檢討結果에서 分子法이 原子法에 졌다. 그 원인중 가장 중요하다고 보여지는 점은 分離係數가 낮다는 점이었다. 이것은 LANL이 채택한 UF<sub>6</sub>의 勵起方式과 관계된다. LANL에서는 赤外레이저에 의해서 振動勵起된 UF<sub>6</sub>가 振動勵起되지 않은 UF<sub>6</sub>에 비해 紫外레이저光을 吸收하기 쉬운 것을 이용해서 U-235를 분리하는 방식(IR+UV方式이라 부른다)을 채택했다.

後에 判明되었지만 紫外레이저는 振動勵起된 UF<sub>6</sub> 뿐만 아니라 基底狀態에 있는 UF<sub>6</sub>를 無差別 분해하기 때문에 分離係數가 낮은 값에 머물렀다. 商業發電用 原子爐의 연료로 필요한 3% 농축우라늄을 제조하기 위해서는 IR+UV法을 사용하는한 캐스케이드의 操作을 행할 필요가 있다. 가스擴散法이나 遠心分離法의 캐스케이드와 달리 IR+UV法の 캐스케이드에서는 固體生成物을 再弗素化시켜 精製하여 다시 UF<sub>6</sub>를 얻어야 하는 工程이 필요하기 때문에 프로세스가 복잡하다. 이 점이 LANL方式의 난점이 되었다.

한편 액손社에서는 赤外레이저만을 사용해서 UF<sub>6</sub>를 분해하는 IRMPD(Infrared Multiphoton Dissociation)法을 검토했으나 UF<sub>6</sub>를 냉각해서 스펙트럼을 尖銳化하지 않은채 레이저를 照射했기 때문에 높은 分離係數를 얻지 못했다.

### 3. 2 1982年以後

미국DOE의 결정에 의해 그때까지 原子法, 分子法, 플라즈마遠心法 등 3方式이 AIS 계획에서 共存하던 시대는 끝나고 原子法에 개발이 집중되었다. 이 시점에서 LLNL의 原子法은 충분한 實力을 이미 가지고 있었는데 일반적으로는 原子法은 아직 學術的 段階라고 과소 평가되고 있는 것 같다. 사실은 1982년 당시 LLNL이 사용하고 있었던 分離器의 능력은 10tSWU/年 규

모의 것으로 10kgSWU/年の 능력을 가지는 遠心機 1,000臺에 해당하는 대규모의 것이었다. 현재 LLNL에서는 實用플랜트의 1module에 상응하는 實證裝置 SISL의 건설이 추진되고 있다. SISL에서 사용되는 分離器는 300tSWU/年の 능력을 가지고 있다고 한다. 또 製品과 廢棄物이 된 금속우라늄은 液體狀에서 연속적으로 회수된다. 이와 같이 原子法은 엔지니어링의 여러 문제를 극복하여 實用을 목표로 규모를 확대해 가고 있다고 할 수 있다.

한편 1982년이후 미국에서는 포기된 分子法에 대해서 다른 나라에서는 진전이 보였다. 우선 赤外레이저의 高出力化가 곤란했기 때문에 부득이 分解用으로 紫外레이저를 導入하였고, 이것이 分離係數의 低下에 原因이 되었다는 점에서 강력한 波長可變의 赤外레이저 개발이 日本과 프랑스, 西獨에서 행해졌다.

일본의 理化學研究所에서는 세계최대급의 水素 Raman laser가 개발되어 1985년에 UF<sub>6</sub>를 사용한 濃縮確證實驗이 행해졌다. 또 최근에는 分子法으로 IR+UV法을 채택하고 있었던 프랑스가 IRMPD法을 발표하여 주목받고 있다. 한편 서독은 일관해서 레이저法으로 分子法 만을 검토하고 있다고 전해지고 있다.

分子法の 反應方式을 表1에 표시했다. 超音速노즐型反應裝置에서 100K정도 냉각된 UF<sub>6</sub>를 赤外多光子解離시키는 방식이 가장 유망하다고 생각되는데, 이를 위해서 필요한 高性能赤外레이저를 이용할 수 있게 되었으므로 앞날이 기대된다.

### 4. '85년 6월 美國DOE의 決定과 影響

1985년 6월 미국DOE는 遠心分離法의 개발계획을 중지하고 미국에서의 次期濃縮法을 原子法 하나로 한다고 발표하여 세계를 놀라게 했다. 여기에 이르른 배경은 앞에서 기술했는데 특히 일본은 遠心法을 개발중인 나라로서 미국이 그때까지 26億달러나 되는 巨額의 개발비를

〈表1〉 分子法우라늄濃縮의 여러 方式과 分離係數

勵起方式 UF <sub>6</sub> 溫度	IR+UV法	IRMPD法
室 温	S ~ 1	S=1.2 (Exxon)
~100K (超音速노즐)	S~2(推定) (LANL)	(S>4) 理研 에서 檢討中。

投入하여 이미 건물과 수천臺의 遠心機 설비를 완성시킨 遠心法 프로젝트를 포기한다는 데에 충격을 받았다.

일본에서는 LLNL의 밀리그램수준의 농축 발표에 자극받아 1976년경부터 日本原子力研究所와 大阪大學에서 原子法의, 日本理化學研究所에서 分子法의 기초연구가 시작되었다. 그러나 LLNL이 수백명의 博士研究者들로 12년간에 3.6억달러 이상의 연구개발투자를 행한데 비해 일본의 규모는 미미한 정도에 그친 실정이었다. 그래서 일본에서도 레이저法の 기술개발대책을 신속히 검토하여 레이저법을 추진하려는 경향이 강해져서 1985년4월 日本原子力委員會우라늄濃縮懇談會에 설치된 Working Group으로부터 보고서가 발표되었다. 다음은 그 概要이다.

## 5. Working Group報告書의 要旨

### 5.1 레이저法우라늄濃縮의 意義

1) 미국과 프랑스에서 개발중인 레이저法은 잠재적으로 대폭 코스트低下가 기대되어 일본도 이 기술을 보유할 필요가 있다.

2) 主要原子力開發國인 일본은 國家安保上에서도 우라늄농축과 같은 기술을 개발하는 것이 중요하다.

3) 레이저法の 추진은 레이저技術, 熔融金屬技術, 電子빔技術, 稀薄流體技術의 개발촉진에 도움이 된다.

### 5.2 레이저法 開發의 現況

(1) 原子法 : 1984년도부터 6개년 계획으로 日本原子力研究所에서 工學基礎試驗을 추진하는 한편 메이커도 레이저 및 分離셀에 대해서 日原研의 機器製作을 통해서, 또 自社研究에 의

해서 연구를 추진해나가고 있다.

따라서 코스트를 포함해서 原子法의 전망을 밝게하기 위해서는 데이터 베이스의 整備를 행하는 한편 콤포넌트의 大型化長壽命化를 도모하고 시스템으로서의 整合性을 유지하면서 개발할 필요가 있다.

(2) 分子法 : 미국과 프랑스가 原子法을 集中研究하는데 反해 西獨에서는 分子法을 採擇하고 있다. 일본에서는 日本理化學研究所가 1985년도부터 3개년 계획으로 原理的實證을 행하고 있다. 理研에서는 최근 여러 외국에 앞서서 高効率高出力 Raman laser를 개발하여 앞으로 超音速nozzle型反應裝置와 併合시킴으로서 경제적인 우라늄농축이 가능하게 되리라고 생각된다. 分子法은 原子法에 비해 分離係數가 작다고 하는데 高溫의 우라늄농축을 취급하지 않으며, 遠心法과 같이 6弗化우라늄을 사용하므로 곤란함이 적다고 보여지므로 앞으로 多光子과정을 사용하는 등의 과제를 해결해 나갈 필요가 있다.

### 5.3 레이저法 技術開發의 推進方策

(1) 레이저法の 추진에 있어서는 技術力을 結集시키는 것이 不可缺하며, 産·官·學의 協力下에 加速的으로 추진할 필요가 있다.

(2) 政府는 原子法의 工學基礎試驗, 分子法의 原理實證試驗과 함께 데이터 베이스의 整備를 추진하고 安全性을 확보하며 일본의 原子力計劃과의 관련을 검토하여 우라늄농축 뿐만 아니라 레이저연구 등 相關된 연구개발을 추진한다.

(3) 原子法에서는 日原研의 公학기초시험의 계속, 日本動力爐·核燃料開發事業團에서의 금속우라늄의 物性研究, 民間 中중에서도 電氣事業者 등을 主體로 해서 메이커를 활용한 研究組合方式에 의한 機器開發을 並行해서 행한다.

(4) 分子法에 대해서는 日原研이 日動燃의 協력을 얻어 原理實證研究를 추진함과 함께 데이터 베이스의 整備를 도모하여 그 결과를 기반으로 推進體制를 검토한다.