

使用済核燃料再処理に関する話題

山 本 寛

原子力開発に伴って、わが国においても将来不可欠になるとされる使用済核燃料の再処理について、主として技術上の問題に関するいくつかの話題をひろって解説した。

1. ま え が き

—再処理とは—

今回政府派遣の再処理調査団の一員としてその方面の海外事情に接する機会を得たのでこの機会を利用して再処理に関係したいくつかの話題についてふれてみた。もちろんこの短文で述べることはわたくし個人の私見に止まるものである。再処理とは原子炉に装入され、燃焼した使用済燃料から、その中に存在する核燃料物質を核分裂生成物から分離して回収するプロセスをいうのであるが、回収される核燃料物質としては原子炉で生成したプルトニウムが主体とされる場合と、燃料中に存在するウラン-235 が主体とされる場合とがある。再処理の目的は原子力開発の初期の段階においては、プルトニウムの取得が目的であり技術の開発も軍用を目的として行なわれたために高度の機密に属していた。しかし原子力の平和利用に伴う動力炉開発の進展に伴って再処理技術の秘密解除が進められ 1957 年のブラッセルにおける再処理シンポジウムを契機として、以来大量の資料が公開せられ今日に到っている。しかしこの方面の施設の見学は今日なお極めて制限されており、アメリカのハンフォード、サバナ・リバー、アイダホの 3 工場のうち前二者の見学を許された日本人はいないはずであるし、イギリスのウインズケール、フランスのマルクールの視察も今まで特別の人に許可されたのみで、過去にウインズケールについては第 1 回原子力調査団、石川・兼重両原子力委員、マルクールについては石川原子力委員が訪問されただけである。今回の調査に当たってもハンフォード工場の見学は許されず、またサバナ・リバーは構内でのディスカッションは許されたが施設の見学は許可されなかつ

た。またマルクールについては許可は与えられたが、決定に到るまでにはかなり強い反対があったときいている。

2. 燃料サイクル費と再処理費

使用済燃料から核燃料物質を回収し、再び燃料に成型加工して原子炉に使用する工程を核燃料サイクルというが、それに要する費用、すなわち燃料サイクル費は、冷却期間中の燃料に対する金利、使用済燃料の輸送費、再処理費、再成型加工費など多くの項目からなっており、また場合によってはウランの再濃縮に必要な一連の工程費用も加算される。核燃料サイクルが経済的に成り立つか否かは上記の諸工程の費用と回収されるウランおよびプルトニウムの価格との見合によってきまる。現状では天然ウラン燃料から回収される減損ウランの価格はその中に残存しているウラン-235 によって決められているためにかかなり低いし、事実再び原子炉燃料として使用することは有利でない。プルトニウムについてもはたして原子炉燃料として使えるか否かの問題がいまだ残っている。したがって現在の段階では再処理事業が平和目的だけで経済的に成立するためにはある濃縮度以上の濃縮ウラン燃料でない限り、回収ウランもしくはプルトニウムが適切な価格で売却できるか否かに密接に関係している。

3. プルトニウムおよび減損天然ウランの用途

プルトニウムおよび減損天然ウランは、速中性子増殖炉燃料およびブランケットとしての用途を見出すことが本筋であることは周知の通りであり、とくに天然ウラン燃料動力炉の開発一本で進んでいるイギリスにおいては、速中性子増殖炉の開発に真剣な努力が払われている。今回の訪問先の一つであるドーンレーでの印象でも

その意気は十分に感取された。しかし速中性子増殖炉については基本的な問題についてはかなり解決されたとはいっても、現在のところではまだ技術上の問題が山積しており、その完成はかなり先のことと思われる。

ドーンレーはスコットラ



マルクール工場全景



ドーンレーの速中性子増殖炉の前にて
日本人左より 筆者、荒川電力中研理事、今井原子燃料公社理事、
事、大山東工大教授、田宮在英大使館員、井上原子力局次長

ンドの最北端に位置しており周辺はビートの原野で、ほとんど樹木のみられない荒涼たる地である。交通はエジンバラから飛行機でスコットランド最北の寒村飛行場ウィックまでとび、そこから自動車で行く。途中に、かつてにしん漁で栄えたこの地方唯一の町ターソーがある。出発に先立ちわたくしは極めて陰うつな、うらぶれた北海のはてを予想していたのであるが、案に相異してこのような北辺に位置しながら、暖流の関係で冬季の寒さはそれほど厳しくなく、また天候もロンドンより晴天に恵まれているという。ついでながらターソーのホテルでご馳走になった地酒のモルトウイスキーは絶品でその芳醇な味は、いまだに忘れられない。施設はこのような辺地にあっても研究遂行上は少しも支障にならず、化学実験器具など電話連絡により翌日には入手できるという。

4. 再処理の方法

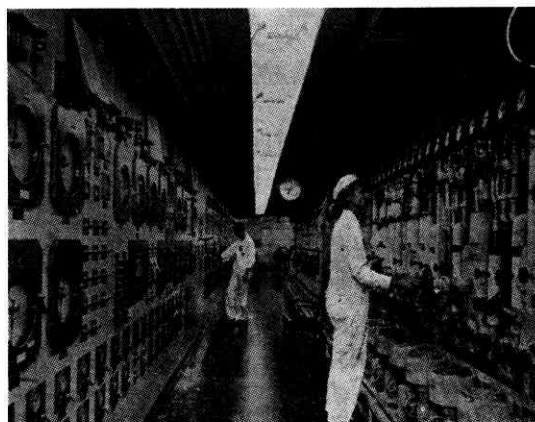
再処理の方法として現在までに研究され、または研究中の方法はかなりの数に上っているが、それらは湿式法と乾式法とに大別される。現在工業規模で行なわれているのは湿式法に属する溶媒抽出法であるが、乾式法の弗化物蒸留法と高温冶金法の開発にもかなりの努力が払われている。乾式法についてはイギリスのハーウエルでも小規模な研究は行なわれているが、現在かなりの規模で研究を行なっているのはアメリカだけである。アメリカでは弗化物蒸留法はオークリッジで高温法、ブルックヘブンで $\text{NO}_2\text{-HF}$ 法の研究開発が行なわれ、高温冶金法はアルゴンズで EBR II 燃料の処理を対象とする研究が進められ、現在アイダホに試験工場を建設中である。

弗化物蒸留法には 1) 溶媒抽出法に較べて工程数が少ない。2) 同一の処理能力で比較すれば装置が小さくてすむから設備費がやすくなる。3) 高レベル廃棄物が固体で、容積が少ないから処分が安全かつ安価に行なえるなどの利点があるが、装置材料の選択、プルトニウムの

分離回収などの点に困難があり、現在ではオークリッジ、ブルックヘブンともにプルトニウムの回収を必要としない高濃縮ウラン燃料の再処理を目標としている。二者のうち前者は特にジルコニウム被覆または合金の燃料のみを対象としているが、後者の方法によればステンレス被覆系、BeO 系、Mo 合金燃料なども処理しうる可能性がある。高温冶金法では除染係数を高めることが困難であるから、速中性子増殖炉燃料の再処理がその目標であり、熱中性子型動力炉燃料の再処理には使えない。

5. 溶媒抽出法

溶媒抽出法についてはアメリカのハンフォード、アイダホではまだ一部ヘキソンを使用するレドックス法が行なわれており、 Ru^* 、 Zr^* についての除染がよいとの優れた点もあるが大勢は TBP を使用するピュレックス法（元来はアルミ被覆燃料を処理する方法に名付けられたものである）に移っている。イギリスのウインズケールのブテックス法（デブチル・カルビトール使用）による第一工場は依然稼働しているが、現在建設中の第二工場はピュレックス法を採用している。このように現在における再処理法の主工程の大勢は英米ともにピュレックス法であり、フランスおよびユーロケミックでも同様である。



アイダホ再処理工場コントロール室

現在行なわれているピュレックス法の抽出主工程は文献に発表されているところとほとんど変わらない。抽出装置にはミキサー・セトラとパルスカラム（ウインズケール第1工場は単なる充填塔）があり、両者おのおの特徴があるが、いずれを採用するかは設計の基本条件に従って技術者が決定すべきものであろう。再処理を行なうためには燃料の被覆材を除去するための前処理工程が必要である。脱被覆には機械的方法と化学的方法の二つが行なわれているが、化学的方法ではアルミニウム以外の被覆材、たとえばステンレス鋼、ジルコニウム、ジルカロイなどの溶解には技術的に困難な問題を多くかかえて

おり、今日なおその技術は完成されていない。また化学的脱被覆では被覆材を薬品で溶解するのであるから、必然的に大量の放射性廃溶液を伴い、この処分費が高価につく。上記の欠点を避けるためには合金燃料など化学的方法による以外に方法のない場合を除いては、機械的脱被覆法を採用する方が有利である。イギリスにおいてはすでに当初からマグノックス被覆燃料の機械的脱被覆を行っており、フランスのマルクールでもこの方法を採用している。米国においては従来化学的方法の開発に努力してきたが、近年は機械的方法の開発にも大いに努力を払っている。



アイダホ再処理工場分析室

6. 再処理工場の遮蔽

いうまでもなく再処理では極めて放射能の高い物質を扱うので、作業員を放射線から護るために十分な遮蔽を必要とする。そのために操作はすべて遠隔で行なわれるから、建設費は一般の化学工場よりはるかに高価になる。また工程管理、計量管理のための分析試料の採取なども特別なかなり複雑な方法を必要とする。

7. 再処理工場の臨界管理

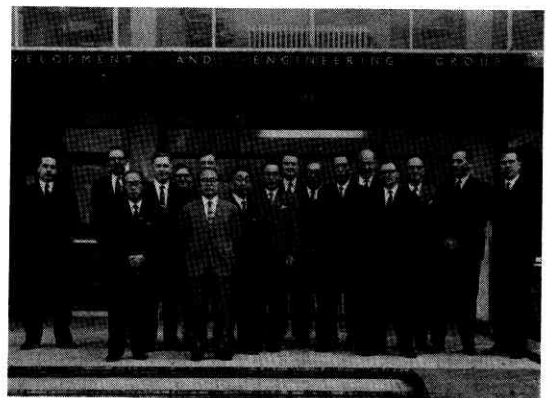
再処理で問題となる今一つの問題はウラン-235 およびプルトニウムの臨界性の問題である。アメリカでは現在までに4回の事故を経験し、うち1回は死者を出している。このように再処理の臨界管理には特別の配慮を必要とする。臨界管理は通常工程機器のジオメトリー、濃度、量の三つについて行なわれるが、完全に事故を起こさない装置を作ることは不可能であるから、嚴重な事故防止対策があわせて講ぜられている。対策としては専門家からなる絶対的な権限をもつ安全対策委員会をもつこと、十分な監視および警報設備を設けること、必要な箇所には適当な中性子毒を用いることなどである。事故の程度はアメリカのアイダホ工場の例では過去2回の事故例については 4×10^{19} Fission/sec および 2×10^{17} Fission/sec

($12,000$ MWsec および 60 MWsec) であったから、この程度の事故に対して、放出される中性子線、 γ 線に対する十分な遮蔽を設ける必要がある。したがってケーブルの実際の遮蔽厚は正常運転時の γ 線によって決めるのではなく、上記のような事故を想定して定めるべきものである。

装置の臨界性問題は計算だけによってきめきれない問題が多く、そのためイギリスのドーンレーでは half machine を使って基礎的な研究を始めている。

8. 再処理工場の保守方式

すでに述べたように再処理の作業は極めて高放射能下で行なわれるため、工程機器に故障を生じた場合の補修が問題になる。補修の方法には二つの方法があり、一つは故障を生じた際には、装置機器を十分洗条して作業員が手をふれて作業できる程度にまで放射能を落としてから直接行なう方法であるが、他の方法は機器を除染することなく、直ちに遠隔操作で補修する方法である。直接保守の方法によれば、工場の運転を停止してから補修にかかるまでに2~3カ月の期間を要するといわれる。この点からみれば工場の稼働率を高めるためには遠隔保守が優れているかにみえる。現在欧米の再処理工場のうちで遠隔保守方式を採用しているのは、アメリカのハンフォード工場とサバナ・リバー工場だけであるが、アメリカの IRG (Industrial Reprocessing Group) は遠隔保守の工場を計画中之であるし、また現在計画中のフランスの第二再処理工場も一部遠隔保守方式を取り入れることを考慮している。一方アメリカのアイダホ化学処理工場とイギリスのウインズケール工場およびフランスのマルクール工場は直接保守方式を採用している。また現在建設中のウインズケールの第二工場も直接保守方式でミキサ・セトラを抽出に使う工場である。またユーロケミックも同様の保守方式を採用することになっている。ここで興味あるのはイギリスのリズレーの技術者達の考え方である。すなわちリズレーの技術者達は工場の稼働率を



リズレーにて

高めるためには面倒な遠隔保守によらないでも保守を不要にすれば直接保守方式でよいと考えている。事実ウインズケールの第一工場は建設以来一度も故障を起こしていないという。保守を不要にするためには最善の設計と製作、建設、検査を行ない、材料も最良のものを使うにあることはもちろんで、かれらはロールスロイスの例を引いていたが、英国技術者の自信の程がうかがえて面白い。しかし実際の建設に当たってはウインズケールの第一、第二工場とも最も放射能の高い溶解、第一サイクル抽出工程に対して1系列ごとに予備1系列を設けて2系列としている。

9. 再処理工場の敷地選定

再処理事業を行なうためには工場の建設に先立って敷地の選定が問題になる。再処理では工場の操業に関係した諸問題のほか使用済燃料の輸送、放射性廃棄物の処理処分、環境の放射能汚染に対する対策など技術的にも経済的にも極めて重要な諸問題をかかえている。

再処理工場がどの程度安全であるかについては人によってみるところが異なるので、現在のところでは候補となる個々の敷地の条件を十分検討して工場敷地を決めることになる。これらの条件は極めて常識的なものであり、地質条件、地下水条件、気象条件、一般サービスに対する考慮などが含まれるが、周辺地区に対して放射能がいかなる場合にも絶対に法定の最大許容値以下になるとの確約は与えることはできないから、工場位置としては極力人口密度の高い地域、食物生産地に近い所はさけるべきである。このような地域を選定すれば放射線防護に必要な資本費、モニター費を減少せしめることができるから、全体からみて土地が隔離されていることから生ずる不利を補ってあまりあることが予想される。再処理工場では敷地内に占める工場それ自身の面積は極めて小さなものであるが、高レベル廃棄物の輸送や、高度に汚染した装置、建物などの輸送はそのために大きな輸送容器を必要とすることや、輸送中に万一事故を生ずれば周辺をはなはだしく汚染することを考えれば、これらの放射性廃棄物を自己の工場敷地内に埋蔵するのが最も安全であり、この点から工場敷地の面積は工場の存続する全期間にわたって発生するこれら廃棄物を貯蔵するのに必要なものとなり、かなり広大な地域を必要とすることになる。また再処理工場の敷地は工場を取り去っても、これらの放射性廃棄物の放射能が安全な程度に減衰するまで他の目的に再使用できないから、この点にも注目する必要がある。また低レベルの放射性廃液を許容濃度以上で地中投棄するような場合（わが国の現行法規では禁止されている）には、地質条件、地下水条件からみて、周辺の住民に絶対に害を及ぼさないだけの十分な広さを確保する必要がある。

10. 使用済燃料の輸送

アメリカおよびイギリスは使用済燃料の陸上輸送についての経験をすでに十分に持っており、鉄道輸送、自動車輸送とも技術上の問題は現在のところほとんどなく、また過去において経験した事故例も極めて少なく、その程度も問題にならないほど軽微なものであった。しかしわが国の場合を考えてみると、問題は単に技術上の問題だけですまされないものと案じられる。関係者が事前に十分に一般民衆に対し教育する必要があることは当然であるが、国民も科学に立脚した合理性を十分わきまえてほしいものである。

使用済燃料の陸上輸送に反して海上輸送に関しては、世界各国ともいまだほとんど経験をもたないのが実状である。陸上輸送の歴史に照らしてみれば10年以前には鉄道もしくは陸運業者は使用済燃料輸送の仕事を受け負うことを躊躇したのであるが（現在はむしろ進んで仕事を引き受けたがっている）、海運業者の現状はちょうどこれに似ているという。わが国の原子力発電会社の場合には、遠路英国まで返送するのであるから、わが国の中の陸上輸送、引受船舶会社、寄航国に関する問題（安全保障もしくはそれ以前の問題として寄航を許可してくれるか否か）、など頭の痛い問題が山積しているのではないかと想像される。

使用済燃料の輸送はカスクに入れて行なわなければならない。この場合カスクの重量は輸送すべき燃料の重量に較べて極めて大きいのが特徴である。このため空カスクの返送も含めて輸送運賃はかなりの額になり、燃料サイクルコストの中の無視しえない部分を占めている。

カスクの設計は送り出す原子炉側と、受け入れる再処理工場側の設備によって決まるので、汎用の規格のものは存在しない。運搬する燃料の重さとカスク重量との関係の1例を示せば、Yankeeの例では2,000ポンドの燃料に対して60,000ポンド、英国の例では2.5トン当たり50トン、IRGの場合には1~2トン当たり約70トンといわれている。

カスクの重量を決定する遮蔽鉛の厚さは使用済燃料の照射履歴と法律で定められた表面線量率とからきめられる。カスクは管理されていない一般の地域を通過して輸送されるものであるから、その設計に対してはかなりの厳重な条件が要求されている。その項目だけを列挙してみれば、

1) 積み出し側で生じるおそれのあるカスク表面の汚染を容易に除去できるよう、表面はステンレスにすること

2) 衝突および取り落とし事故に耐えるだけの強度をもたせること—衝突に対しては32 km/hr、取り落とし高さに対しては15 mでカスク本体に重大な変型が生じ

ないことまた衝突に際してカスクと台車が分離しないこと—

- 3) 表面線量率が規定以下の値であること
- 4) 加温および冷却設備をそなえること などである。

11. 再処理に伴う放射性廃棄物

再処理の際に分離される放射性廃棄物の放射能は莫大なものであって、ラジオ・アイントープ使用に伴うそれとはぜんぜん比較にならない。放射性廃棄物は気体、液体、固体に分けられるが、このうち固体は環境汚染の立場からは問題となることが少ない。気体廃棄物中の Kr^* 、 Xe^* は欧米ともに大気中に希釈拡散処分するのが普通であるが、実験的に若干の処理を行なっているところもある。アメリカでは再処理工場はいずれも隔離された土地に建設されているから、廃気の問題はほとんど重視されていない。この点は英国、フランスも同様であって、廃気の希釈拡散に適した気象条件をもつ土地に工場が建てられている。しかし気体廃棄物は放射能からいえば相当なものであるし、特に ^{85}Kr は半減期が約 10 年あるから、このものが食物サイクルにまったく入らないものであり、呼吸によっても体内に吸収されないとはいっても、将来は問題にされることも出てくると考えられる。しかし現状では一般民衆に対して法定の最大許容濃度以下に保つことは容易である。

放射性廃液は再処理廃棄物の中で最も問題となるものである。もっとも放射能からいえば、放射能レベルの最も高い 1 次抽出廃液が廃液全体の放射能の 99.99% 以上を占めており、このものはタンクに長期貯留されるから、この放射能が環境に放出されることはほぼぜったいにないといつてよい。しかし 1 次抽出廃液の中には ^{90}Sr 、 ^{137}Cs のような長半減期の核種が含まれており、これが安全に環境に放出できるようになるまでには、数百年ないしは 1000 年近くもタンクに貯えておかねばならない。このような長期にわたる貯留を行なうためにはタンク貯留のみに頼るとすれば、このような長期間の使用に耐える容器を製作することはできないから、適当な期間貯留すれば次の新しいタンクに移して、さらに貯留を続けることになる。現在欧米では、だいたい 50 年の耐用年数を考慮してタンクを設計している。

しかし将来原子力開発の進展に伴って、生成する核分裂生成物廃液の量は膨大となることが予想され、タンク貯留のみに頼ることはコストが高い上、安全性の面でも完全とはいえないから、長期にわたってさらに安全に貯蔵のできる他の方法を開発することが不可欠となる。このことは国土が狭く、人口密度が高いわが国においては

特に重要な問題となる。また特に地震などの発生を考慮すればその重要性はさらに大きくなる。現在研究されている方法には、

- 1) 適当な期間（廃液は貯留の初期 2~10 年くらいは自己発熱が著しいので冷却その他による熱除去の方法を講じなければならない）タンク貯留したのち、適当な地殻構造の中へ廃棄する方法

- 2) 廃液を固化することによって貯蔵量を大きく減少させるとともにさらに安全に格納できるようにする方法

- 3) 廃液中の ^{90}Sr 、 ^{137}Cs を分離してこれの有効利用をはかるとともに貯留期間を短縮する方法—このためには分離率は極めて高くする必要がある—

などがあり、近い将来にはいくつかの方法が確立されるものと期待される。

中低レベル廃液は放射能からみれば再処理の際に分離される廃液放射能の 0.01% 以下にすぎないが、その絶対量はラジオ・アイントープの平和利用に伴う廃棄物のそれとはなお比較にならないくらい大きい。またこの廃液の量は極めて膨大であるためタンク貯留などの方法で環境から隔離することは不可能である。廃液量は放射能レベルが低いほど大きくなるからこのような廃液を処理しても廃棄液の濃度を $10^{-4} \mu\text{c/ml}$ 程度以下に下げるとは大きな処理施設と莫大の処理費を必要とする。このため欧米においては処理はこの程度のところで止め、あとは地中、海洋、河川への処分にあずかっている（ただし処分後の濃度は法定以下になるよう十分管理されている）。しかしわが国においては管理区域外への最大放出許容濃度が $10^{-8} \mu\text{c/ml}$ と法律で定められている（核種不明の場合）から、法規を守るとすれば欧米に較べて格段に厳重なことになり、わが国で再処理事業を行なう場合にはこの点の対策が極めて重要な課題となってくるであろう。

12. あとがき

以上極めて定性的に再処理の概説、最近の技術上の動向、再処理に付随する問題点について述べてみた。今回の調査の調査目的の中には再処理の経済性に関する事項が大きな課題として含まれていたが、この短文では省略し、話題をできるだけ技術的な問題だけに限定した。今回の訪問国はアメリカ、イギリス、フランスを主体としているが、これらの 3 国ではおのおの再処理技術の開発の仕方によくその国民性が現われており、また開発の進め方にも、おのおの相違があってその点たいへん興味深く感じた次第である。 (1961 年 10 月 11 日受理)