

フランスからの核廃棄物ガラス

The Returned Nuclear Waste Glasses from France

寺井 良平
Ryohei TERAI

寺井ガラス技術事務所

問合せ/テライ リョウヘイ 〒567-0815 茨木市竹橋町11-11-303 TEL 0726-26-9140 FAX 0726-26-9140
E-mail/rterai@nifty.com

キーワード：返還ガラス固化体，核廃棄物ガラス，地層処分

1 フランスからの返還ガラス固化体

数年前，フランスから「核のゴミの入ったガラス」が返って来るといふニュースが報じられ，世界の「グリーンピース」がその航路の安全性を問題にしたことがあった．また，それがわが国に到着した時には，青森県知事がこの廃棄物の陸揚げに異論をとなえ，一時政治問題化した．懸案の最終処分地は先送りされて曖昧決着となったが，この時陸揚げされた核廃棄物ガラス固化体は青森県六ヶ所村の「高レベル放射性廃棄物貯蔵管理センター」に収容，貯蔵された．以来，海外からのガラス固化体返還は既に7回に及び，2002年3月末現在，ステンレス鋼製容器（キャニスター）にして616本もの固化体が収納されている．そして将来その数はイギリスからの返還分も含めて3,500本に達すると予想されている．

このキャニスター（150リットル）一本には，ガラス約400kgが充填されている．その約10%は高レベル放射性廃液からの酸化物が占め，最大 4.5×10^{16} Bq（ベクレル）の放射能が閉じ込められている．この量は広島原爆の30個分に相当するといわれ，これが自然界のレベル以下になるには一万年以上の時間を要するという．

当面30～50年，崩壊熱の減少を待つために管理・貯蔵された後，しかるべき場所に処分されることになるが，その最終処分地はまだ決まっていない．しかしこれ

を「地層処分」という計画自体は，昨年の国会で既に承認・立法化され，実施主体の「原子力発電環境整備機構」の設立が認可された．つまり核廃棄物ガラスはいずれわが国のどこか安全と思われる地層に永久に処分されることになるわけである．

2 フランスのラ・アーグ再処理施設

フランスに再処理委託された使用済み核燃料は，未使用のウラン（U）と生成プルトニウム（Pu）をこれから回収し，新しいMOX（UとPuの混合酸化物）燃料と核廃棄物ガラス固化体となってわが国に返ってくる．この再処理工場は，イギリス海峡に突出したコンタンタン半島（ノルマンディー半島）先端の寒村にある．この過疎地が選ばれたのは，ここが古くからの軍事施設サイトであり，原爆用のプルトニウム製造工場があったことによるのであろう．近傍に原子力発電所もある．一説には，強い風と速い潮流が，排出される放射性ガスや廃液の拡散に都合がよいからであるともいわれている．

私は，先年春，コンタンタン半島付け根のモン・サン・ミッシェル修道院（世界遺産）や連合軍上陸作戦で名高いバイユーという田舎町を訪れたことがあるが，半島先端のラ・アーグまで足を伸ばす余裕はなかった．し

解説

かし周辺は鄙びた牧草地や麦畑の広がる農村で、風よけの木立や土塁が多く、折しも、方々に白いリンゴの花が咲き乱れ、静かな佇まいを見せていた。羊や鶏のうろつく村外れの小さなリンゴ酒蒸留所で、シードル（発泡酒）やカルパドス（蒸留酒）を振舞われたが、舌にしみる感じのこの酒は私の好みにあわなかった。しかしノルマンディー一帯では、ワインよりもリンゴ酒の方がよく飲まれるという。

返還されるガラス固化体は、そのラ・アーグに程近いシェルブール港（原潜基地でもある）から日本に向けて船積みされる。ミュージカル「シェルブールの雨傘」のあのシェルブールである。そして、その度に「グリーンピース」の監視が物々しく報道され、輸送経路にあたる国々からは再三輸送反対の声明が出される。

3 むつ小川原港の受入れ

シェルブールを出た船は、いろいろな航路をとって青森の「むつ小川原」港に入る。この1月末に入港したバシフィック・サンドパイパー号（第7回輸送）はパナマ運河をぬけてきたという。これにはキャスクと呼ばれる輸送容器6基にガラス固化体が152本積み込まれていた。

そして、六ヶ所村に陸揚げされ収納されるとき、(1) 発熱量、(2) 外観、(3) 寸法、(4) 重量、(5) 放射エネルギー、(6) 閉じ込め性、(7) 表面汚染についての検査を受ける。初回の受入れ時に、セシウムの外部汚染が見られ、貯蔵庫への収納の遅れる事故があったが、その後は無事故で推移しているようである。受入れ時のキャニスター表面温度は一般に280℃、中心部は410℃ほどである。この温度ならガラスの再溶融、あるいは再結晶化の恐れはないものと思われる。50年経てば、これも100–150℃に下がる見込みで、その時点で深地層に処分するというわけである。

4 マルクール・ガラス溶融システム（メタリック・メルター）

ラ・アーグのガラス工場の溶融方式は、メタリック・メルター法またはAVM (Atelier de Vitrification de Marcoule) 法と呼ばれる。フランス南部のマルクールにおいて開発されたため、その名が冠されているので

ある。

私はこのマルクール・ガラス工場を何年前に訪れたことがある。この開発を担当したフランス最大のガラス会社・サンゴバンがここを案内してくれた。マルクールは高速増殖炉・フェニクスの開発が進められているフランス原子力センターの一つであり、そのためアンチ原子力グループの攻撃標的ともなっていたので、そこへの出入りは非常に厳しい制限下にあった。カメラやパスポートを取り上げられ、生年月日や出生地まで詳しく聞かれ、物々しいゲートをくぐった覚えがある。その後、ここでは実証炉スーパー・フェニクスこそ開発計画は中止されたが、今なお原型炉フェニクスはテスト運転を続けている。

しかし、そのサイトはアルプスに源を発するローヌ川に沿った豊かなプロヴァンスの山中にあり、マルセイユから一時間半ほどの快適なドライブを楽しんだ。しかも途中には、エクス・アン・プロヴァンス、アルル、アヴィニオン、ニームといった南仏の有名都市が川沿いに散在し、ニームの円形古代闘技場を見学したり、アヴィニオンの橋のたもとで写真を撮ったり、ポン・デュ・ガールというローマ時代の水道橋のほとりで小休止したりしたことを思い出す。穏やかな冬日の素晴らしい田舎道、垣間見た石造り農家の佇まい、まさにそれは『南仏プロヴァンスの12ヶ月』という世界的ベストセラーでピーター・メイルが描き出した風景そのままであったように思う。その折、ガラス工場責任者の案内で、サイト近くの古城のレストランで昼食をご馳走になったが、そこで何を食ったか忘れてしまったけれど、ただ強烈な匂いのチーズをすすめられとことが未だに私の記憶に残っている。彼らは腕を差し出し、SEIKOの時計を見せ、加えて盛んにTOYOTAやHONDAの技術を誉めた。

私たちの訪れた時は、たまたまガラス溶融炉は故障のため停止していたが、窓ガラス越しに、その片貌を覗き見することができた。もちろんすべて無人の遠隔操作で運転されている。この炉の概略模式図を図1に示す。

高レベルの放射性廃液はロータリキルンで仮焼(600℃)され、ガラス粉末と混合されて、インコネル(クロム鉄合金)製の溶融坩堝に投入される。この坩堝は10kHzの高周波誘導によって加熱され、混合物は1050–1100℃の比較的低い温度で溶かされる。逆にいえば、坩堝が金属なので余り高温にできず、シリカ含有量も45%に抑えられている。坩堝は3000時間の使用に耐える設計と説明されたが、実績は2000時間に及ば

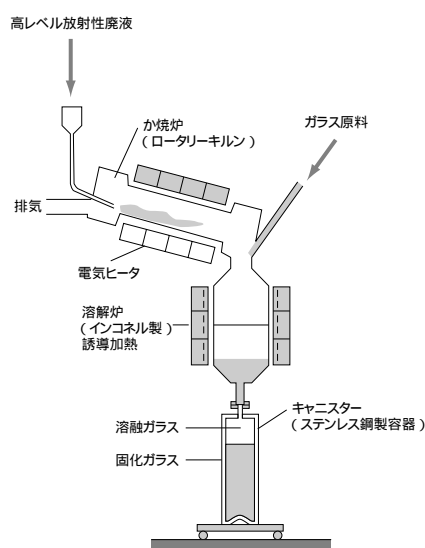


図1 AVM法のガラス溶融炉（メタリック・メルター）模式図

ないようであった。溶融は8時間でワンサイクル、これを連続3回繰り返す。炉の下に設置されたステンレス鋼製の円筒形キャニスターに鑄込まれ、一日一本の割で満杯にされる。蓋を溶接して洗浄後、一時貯蔵のための地中に掘られたピットに運ばれ、格納される。何十と床に並んだピットはそれぞれ9段積みの構造になっており、崩壊熱による発熱に備え強制空冷されていた。2年ほど経過したものから順次自然空冷に切り替えるという。私たちは、その多数のキャニスターの入ったピットの上を案内されて歩いたが、既に使用中のピットとまだ空のピットとは、色違いの鉄蓋（コンクリート厚さ1.5m）で区別されており、その上を特別な放射線の防護なしに安全に歩くことができるという説明があった。ラ・アークのガラス工場は、マルクールの倍の規模に拡大されており、いろいろ改良も加えられているが、その基本的なシステムに変わりはないものと思われる。

この事務所には、放射能を含まない模擬の廃液で作られたガラス固化体の塊が、見本として展示されていた。それは真っ黒なガラスで、ちょうど黒曜石のような感じがした。

5 ガラスからのモリブデン分離

この展示模擬ガラス固化体に、小さな黄色い球形の異物の存在することが目視された。私には、それが直ぐガ

ラスに融けきらない酸化モリブデン (MoO_3) の相であることが分かった。これはイエロー・ソリッドとも呼ばれ、うまくガラスに溶け込まない成分として問題視されていたからである。

ガラスの基礎組成はホウケイ酸塩であり、もともとシリカ成分 (SiO_2) とホウ酸成分 (B_2O_3) とは十分に溶けあわない分相傾向をもっている。これにモリブデンを添加すると、その分相傾向は一層増大する。また模擬廃棄物を含むガラスを適当な温度で熱処理するといろいろな結晶を析出するが、その結晶を同定してみると、希土類元素を含むモリブデン酸塩であることが多い。つまりモリブデン化合物はガラスに非常に溶けにくく、一旦溶けてもまた簡単に分離するのである。しかも分離したモリブデン相は水に溶け易く、それだけ放射能の閉じ込め機能が低下する。この分離を避ける最上の方法は、廃棄物含有量を低く抑えるにしくはないが、それでは廃棄物の減容比を上げることができず、ガラス固化体の数を減らすことにつながらない。

6 高濃度廃棄物ガラスの試み

ガラスのホウ酸成分を増やすと、モリブデン分離は減少するが、ガラスの化学的耐久性は低下する。そこでモリブデンを廃液から予め取り除いておくことが考えられた。モリブデンの7-8割は液中に溶けずに固形物として存在しているし、溶けているモリブデンも加熱・静置や脱硝などの化学操作によってすべて沈殿させることができる。これを濾過して廃液から取り除くのである。これによって確かに廃棄物含有量を高めることができるけれども、余り高濃度に廃棄物を詰め込むと、今度は放射能崩壊に伴う発熱が増大し、貯蔵中の固化体の温度が上昇する。ガラスが再結晶化するほど高温に達することは危険だから、高濃度に廃棄物を詰め込むためには、発熱の原因となるストロンチウムやセシウムをも予め分離除去しておく方がよい。更にしばしば固形物として存在する白金族元素（パラジウム、ロジウム、ルテニウム）も分離除去すれば、これらは貴金属として多くの再利用の道があるから、廃棄物リサイクルにもつながる。このような考えによって、成分を幾つかのグループに分けて廃液から分離する方法は「群分離技術」として以前から検討されていた。特に危険な長寿命核種を分離して、これに中性子線などを照射し、より安全な核種に変換する「消滅処理」という方法も提案されていた。多分今でも

解説

これらの技術は検討され続けているのではなかろうか。

しかし、この「群分離」や「消滅処理」は、実験室的には可能でも、実際の工程では複雑な操作や装置・施設を必要とし、コストの点でも問題多く、結局実用に結びつかずに今日に至っている。したがって、返還ガラス固化体は依然廃棄物のグロス（一括）固化方式で作られており、その内部に分離物が存在する可能性も否定できない。それどころか、ガラス溶融用の坩堝も 2000 時間ほどで寿命が尽きると、直ちに裁断されてキャニスターに投入されるはずであり、更に炉操業の都合によっては、委託した燃料以外の廃棄物も返還キャニスターに含まれる可能性があるという。

7 ガラスへのグロス固化

高レベル放射性廃液を液体のまま貯蔵することは非常に危険で、嘗てアメリカの原爆製造工場の廃液が貯蔵タンクから漏洩するという事故があった。それ以来固化技術の検討が始まり、さまざまな方法が提案された。リン酸塩ガラスや高シリカガラス、ホウケイ酸ガラスなどのガラス固化法は最も歴史が古く、その他ゾルゲル法、金属埋め込み法、セラミックス化法など 20 を越える処理方法が方々の国で検討された。しかし現在実際に稼動している唯一の固化方法はガラス固化のみである。

ところで、ガラスよりも優れた固化体として、合成岩石 (SYNROC) や焼結セラミックスを推奨する意見がある。この場合、セシウムやストロンチウムは岩石の構成成分の一つとして固定されるので、これら危険核種の浸出率はガラスに比べてかなり低くなると推定される。しかしこのようなセラミック固化においては、廃液中に多量に存在する非放射性のナトリウムの処理や危険核種の「群分離」が前提条件となるので、その技術的信頼性や経済性に問題があり、まだ実績がない。その点、極めて雑多な成分を含む廃液を、一二の元素を除いてどんな成分でも、一括固化してしまうガラスというマトリックスは、このような廃棄物処理に適合した材料であると見られてきた。アメリカ・エネルギー省主導で数多の固化処理技術の優劣評価が行われた折にも、ホウケイ酸ガラス固化が最も高い得点を獲得したのはこうした理由に根拠があるであろう。またこれが今日のガラス固化方式を採用する出発点となったように思われる。

8 わが国はセラミック・メルター

わが国ではメタリック・メルターよりも大容量・高温で溶融できるセラミック・メルター方式が選ばれ、すでに東海村 (TVF) で実証運転に入っている。この炉では溶融ガラスと直接接触する炉本体の材料に、耐食性に優れた電鍍・酸化クロム系の耐火物 (セラミックス) が選ばれ、廃液はガラス・ファイバまたはガラス粉末と混合して直接炉に挿入される。したがって「液体供給方式」とも呼ばれる。ガラス融液に挿入された電極 (インコネル製金属板) を通じて直接ガラスに電流を流し、そのジュール発熱によって 1250℃ ぐらいまで温度を上げる。溶けたガラスはフリーズドバルブ、底部ドレインを通じてキャニスターに鑄込まれる。

この方法は AVM 法に比べ、廃液仮焼の必要がない、炉材が長寿命 (約 5 年) である、化学的に強いガラスができるなどのメリットがあるが、白金族の分離問題はまだ未解決らしい。白金族の Ru, Rh, Pd は重いので溶融槽の底部に堆積し短絡通電してガラス溶融を妨げたり、炉材を侵食したり、ガラス出口を詰まらせるなどのトラブルの原因となる。しかし今のところ、これを予め分離することなく、一括固化の方式で処理されている。

六ヶ所村の新工場 (2005 年稼働予定) もこのセラミック・メルター方式を受け継ぐはずで、これによって将来数万本のガラス固化体がここで作られることになるという。

9 ガラスは地中で何年もつか

「群分離」や「消滅処理」、更にはより優れた「ガラス溶融炉」の開発は、今も引き続き行われているけれども、最近の高レベル放射性廃棄物問題は、どのような固化体を如何に作るかという処理技術よりも、むしろガラス固化体をどのように「地層処分」するか、という処分技術の方に議論の中心が移ってきている。

一昨年、核燃料サイクル開発機構は「わが国における高レベル廃棄物地層処分の技術的信頼性 ―地層処分研究開発第 2 次取りまとめ―」という報告を発表した。これに対して、例えば地震国日本に果たして安全な地層が存在するのか、深地層という未知の領域での工学的施設にどの程度信頼がおけるのか、また地中であって、多重バリアで囲われていても、ガラスは次第に水に溶け、その危険核種が長い時間をかけて人間社会に戻る恐れはな

いのか、などの議論が行われている。その中で、ガラスが地中で「7 万年もつ」という核燃料サイクル機構の試算に対して、批判グループは「270 年しかもたない」という計算結果を示し、大きな食違いを見せている。この差は精密な議論で埋められねばならない。

10 ヨーロッパの脱原子力宣言

一方、ヨーロッパにおいては、チェルノブイリ事故を契機に原子力開発から撤退する傾向が顕著になってきた。最近のスエーデン、ドイツに次ぐベルギーの「脱原子力宣言」はこの動きを鮮明にしたといえる。プルトニウムや MOX 燃料の危険性が指摘され、世界的に高速増殖炉の開発が行詰まり、燃料再処理工場の閉鎖や建設中止が相次いだ。また新たな原発の建設も、少なくとも欧米では、フランスを除いて皆無となった。わが国でも高速増殖原型炉「もんじゅ」の事故、JOC の臨界事故などが続き、最近の世論調査結果にも次第に開発に慎重な傾向が示されつつある。

その上、原子力発電は、再処理や廃炉処分・廃棄物処理処分に必要な費用まで含めれば、必ずしも他の発電手段に比べて有利とはいえないとする議論がある。特に電力自由化による民間発電力の買い上げ制度が本格的に軌道に乗り、小地域社会での燃料電池、廃棄物焼却熱の利用や電力のコージェネレーション・システム、あるいは風力、太陽光、太陽熱、バイオマスなどの利用が進めば、益々原子力発電はコスト的に不利になると予測する人がある。

更に、地球環境を守るという立場から、原子力に投入する膨大な資金を再生可能なエネルギー開発にこそ振り向けるべきであるとする意見が、特にヨーロッパにおいて、次第に強まりを見せている。このような潮流の中で、わが国は依然として原子力発電、燃料再処理の路線を走りつづけているが、いつまでこの方針を固持し続けることができるのか、道路・港湾などの各種公共投資の行詰まりとともに、ここにも変革の転換点が差し迫っているかのように見える。

(終)