

# ウィンズケール改良型 ガス冷却炉の廃炉

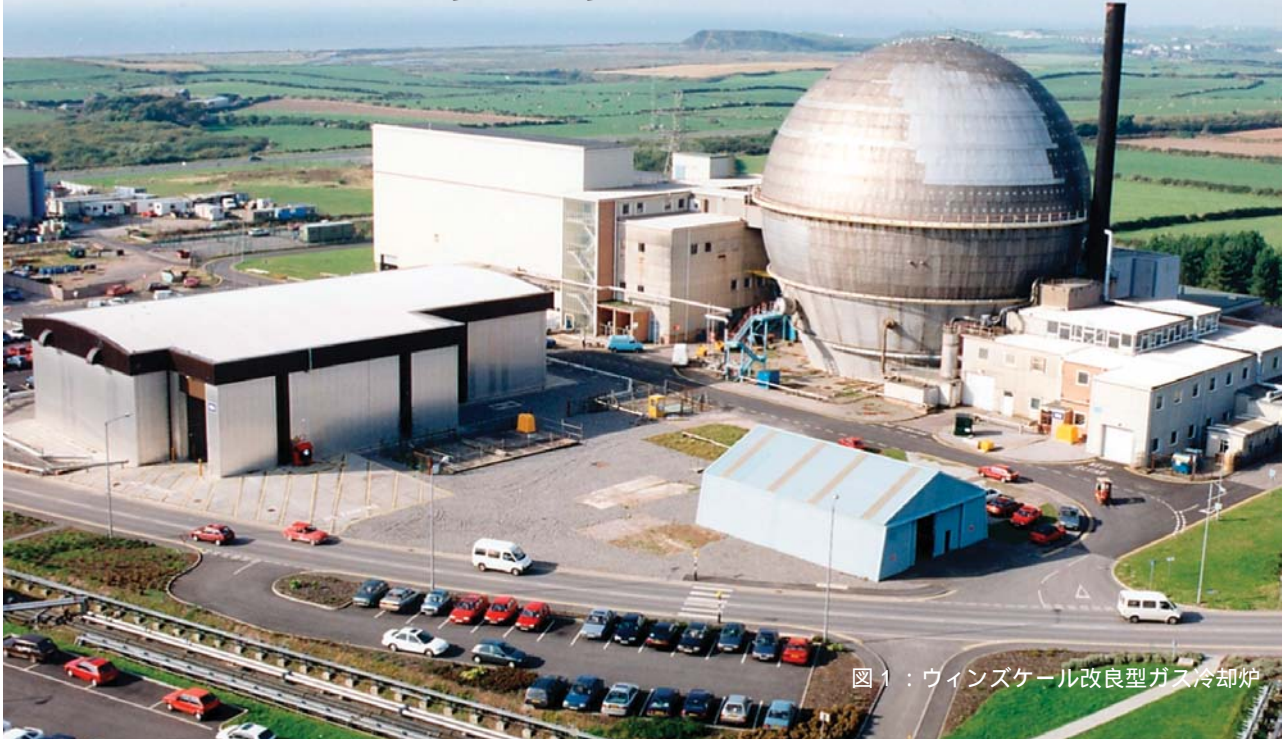


図1：ウィンズケール改良型ガス冷却炉

## 英国の発電炉廃炉実証プロジェクト

文：テリー・ベネスト（Terry Benest）、ミシェル・ワイズ（Michelle Wise）

英原子力公社（UKAEA）は、1940年代後半より、広範な原子力施設の建設と運転を行ってきた。UKAEAには、各施設的环境を安全かつ確実に修復する任務がある。この修復には、多数の余剰な研究炉や発電炉の廃炉も含まれる。

発電炉の閉鎖直後の廃炉にあたり、数多くの工学的、技術的、環境的な問題が課せられる。カンブリアにあるウィンズケール改良型ガス冷却炉（WAGR）（図1参照）では、UKAEAとその請負会社が炉心と圧力容器を撤去するプロジェクトを進めており、この原型発電炉の廃炉を通じて問題の一部に答えを出そうとしている。このプロジェクトは、1998年、遠隔操作によって炉心構造物を取り外すことで始まった。それ以降、プロジェクトは急速に進行しており、現行の廃炉計画は2006年夏までに完了する見込みである。

### 原子炉の歴史

WAGRの建設目的は、改良型ガス冷却炉系を研究すること、商用炉にふさわしい燃料性能を運転中に立証すること、燃料や他の部品の新たな開発の試験設備として機能すること、および発電の運転経験を積むことであった。その後、WAGRで得た知識や経験をもとに、7サイトで14基の原子炉が建設された。

WAGRは、ステンレス鋼缶に入れられた二酸化ウラン燃料を使った二酸化炭素冷却・黒鉛減速原子炉である。同炉は、両端が半球状の円筒形原子炉容器に収納された直径4.57m、高さ4.27mの黒鉛減速材より構成されている。原子炉とそれに伴う熱交換器は、最大直径41.1m、高さ40.8mの鋼製格納容器に収納されている。WAGRは、1957年から1961年にかけて建設され、1963年には設計全出力に達し、

3万3,000kWの電気出力（平均稼働率75%）で18年間稼働した。同炉は1981年に、すべての研究開発の目的を十分に達成し、閉鎖された。

### 廃炉への動き

UKAEAは、英国内で今後予想される廃炉要求を見越し、1975年にWAGR廃炉のための予備調査に着手し、1981年には、同炉をステージ3までの廃炉（施設の占有区域を無制限に再使用できる状態まで修復すること）に処することを決めた。

このプロジェクトの当時の目的は以下の通りである。

- ・原子炉を、予算と被ばく線量の観点から安全かつ手頃なコストで解体できることを実証する。
- ・放射性廃棄物処分のための方法と適切な承認手順を確立する。
- ・工学的な問題を明示し、それを克服するための必要な機器と技術を開発する。
- ・原子力発電所、特にガス冷却炉の設計と廃炉に使われる情報、データ、専門知識を取得・記録する。

1993年に、主な関係者の協力を得てプロジェクトのレビューが行われた。複数の調査から、WAGRの廃炉を続行するより、整備や保守の方が政府にとってコストがかからないことが示された。原子力発電各社は、このプロジェクトを確実に継続するために、この分のコストを分担することに同意した。同レビューは、技術開発やデータ収集より、経済的な廃炉を重視すべきであると結論づけた。廃炉プロジェクトは、炉心と圧力容器のデコミッションングによって完了すると再定義され、バイオシールドと封じ込め用構築物の取り壊しは延期することとした。その後、プロジェクトの目的も見直され、以下の通りとなった。

- ・原子炉閉鎖直後に炉心のデコミッションングを実施できることを示す、英国の発電炉廃炉実証プロジェクトとする。
- ・デコミッションング作業が安全であり、環境的に許容され、現在の技術により手頃なコストで実現可能であることを示す。

### 廃炉計画

炉心や圧力容器の放射性部品を取り外す上で技術的に困難な点は、主として、1時間あたり約1シーベルトの放射線量率が予想されることであった。このような高い線量率のため、手作業による解体が不可能となり、遠隔操作装置を使用しなければならなかった。一方、ホットボックスおよび関連部品から

の線量率が顕著に低く、これは炉心とホットボックスの間に中性子遮蔽体が組み込まれていたためである。したがって、この区域での解体は、遠隔、半遠隔、および手動操作を組み合わせることで実施できた。

遠隔操作を実施するための主要な装置として、以下の構成が考えられた。

- ・高線量部品を解体するための工具を配置する遠隔操作装置
- ・解体部分を取り外すための回収・運搬装置
- ・解体部品の移動、選別、分析評価、および適切な容器への梱包を行なうための廃棄物経路
- ・廃棄物の処分または貯蔵のための調整プラント
- ・貯蔵・処分容器
- ・中レベル放射性廃棄物（ILW）ボックスの中間貯蔵施設

#### 解体プラント：遠隔解体装置

UKAEAは1986年に、遠隔解体装置（RDM）（図2）の建設を、800万ポンド（1,250万米ドル）でストローン・ヘンショー社に発注した。このRDMは、隣接する建物の専用制御室から操作され、原子炉運転フロアに設置されたターンテーブルの真下に配置された取り扱い装置2台からなる。伸縮マストから、遠隔操作コンピューターと一連の吊りクレーンレールが吊るされており、3トン・ホイストが原子炉ドームを横断して隣室に移動することができる。このターンテーブルの上に位置する2階建て建屋には、点検を行ったり、工具の取り替えや保守のためにアクセスしたりするための設備が収容されてい



図2：遠隔解体装置のモデル

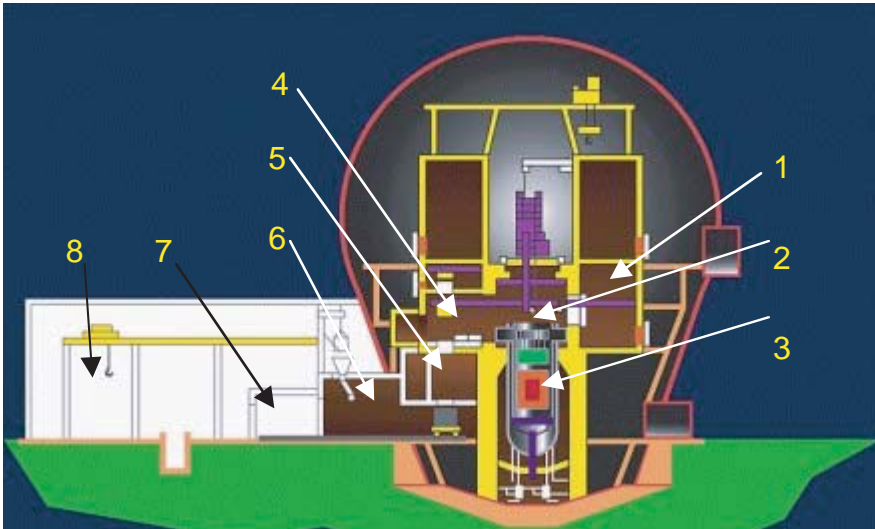


図3：廃棄物経路と廃棄物梱包プラントを示す施設略図

- |            |          |
|------------|----------|
| 説明： 1. 保持室 | 5. 上部装荷室 |
| 2. 原子炉ドーム  | 6. 下部装荷室 |
| 3. 炉心と圧力容器 | 7. 移送室   |
| 4. 判定室     | 8. 搬出施設  |

る。ターンテーブル建造物内の鉛ショット充填フロアが、操作員を放射線から遮へいする。RDM 建設中の被ばく線量を最小限に抑えるために、ホットボックスの露出面上に一時遮へいフロアを作った。試験架設を行った後、1993年に RDM を原子炉の上に最終配置した。

#### 廃棄物経路

廃棄物経路は、熱交換器バイオシールド2体の遮へいコンクリートを活用するために、これらのシールドを通るように建設された。このために、熱交換器を最初に12メートル持ち上げて経路空間を作った。ダイヤモンドドリル穿孔法により、原子炉ドームに開口部を作り、RDM と一体化した3トン・ホイスト搬送装置がアクセスできようにした。

廃棄物は、原子炉から廃棄物梱包プラントに水平移動され、プラント内で廃棄物の特性評価と封入が行われる(図3参照)。原子炉の端から出て、まず判定室に入れられた廃棄物は、ラックまたはバスケット状のボックス装備内に置かれる。この直下に位置する低バックグラウンド環境の上部装荷室では、廃棄物のガンマ線量率が測定される。廃棄物の入ったボックス装備は、連絡用トラップドアを通り抜け、下部装荷室のトロリーのの上に置かれた WAGR ボックス内に装荷される。この操作では、判定室上部のホイストルームに設置された8トン・ホイストが使われる。

#### 廃棄物梱包プラント

廃棄物梱包建屋では、原子炉ドームから除去され

たすべての廃棄物が、WAGR コンクリート廃棄物ボックス内に置かれ、セメントグラウトで密封梱包される。高線量率が予想されることから、このプロセスは遠隔操作しなければならない。したがって、廃棄物梱包建屋は、上部および下部装荷室という2つの遮へい室から構成されている。

廃棄物とボックス装備が下部装荷室のボックスがに装荷されると、格納容器ドアが開き、それを通り抜けてトロリー上の容器がコンクリート室へ運ばれる。専用のグラウト・コンクリート・プラントで混合された充填グラウトが容器に注入され、隙間が埋められる。ボックスに鉄筋コン

クリート製蓋が打設され、容器が完成する。移送ステーションへ至る遮へいドアを開けて、トロリーが通り抜けられるようにし、容器が60トン建屋クレーンで持ち上げられるようにする。

詳細な放射線調査を行い、表面汚染がないか点検した後、ボックスを養生・計量ピットに入れる。このピットは、完成したボックスの上に次の空ボックスを持ち上げることができるように、床下に設置されている。コンクリート蓋が、損傷を受けることなく移動できる十分な強度(1ミリ平方ミリメートルあたり20ニュートン、または30時間)に達した後、これらのボックスが施設から搬出される。低レベル廃棄物(LLW)ボックスは、ドリッグにあるBNFL社のLLW 処分場へ道路輸送されて処分されるが、ILW ボックスは、NIREX 社のILW 処分場が稼働するまで WAGR ILW ボックス貯蔵施設へ運ばれて一時貯蔵される。

#### WAGR 廃棄物ボックス

LLW と ILW の貯蔵・処分のために WAGR で採用されている容器は、上部に入口のある2.4×2.2×2.2mの矩形鉄筋コンクリートである(図4)。この容器の囲い壁は、構造上の健全性と内容物の放射線遮へいを提供するが、このような寸法を選んだのは、WAGR の熱遮へい板と黒鉛ブロックを切断せずに収納するためである。内容物の遮へい要件に応じて、2種類のコンクリートを用いてボックスを製造する。廃棄物の大多数については通常密度(2.4 t/m<sup>3</sup>)コンクリートを、またより高レベルの放射性廃棄物については磁鉄鉱骨材を用いた高密度(3.9 t/m<sup>3</sup>)

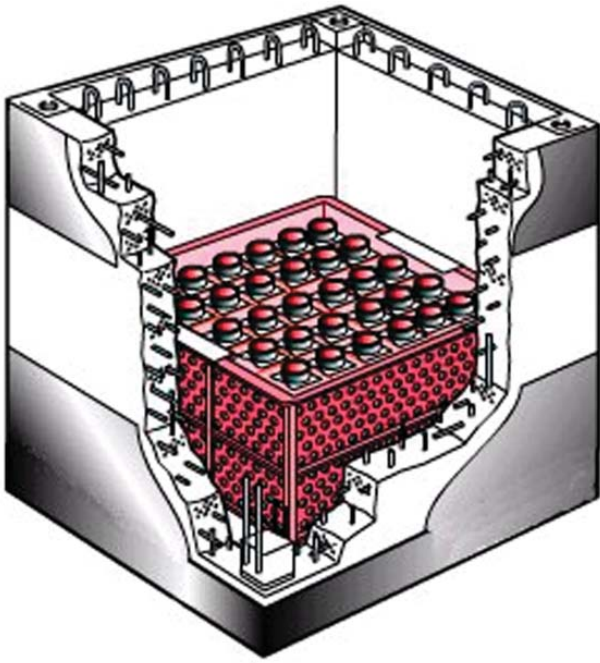


図4：WAGR プレキャストコンクリート製廃棄物ボックスの略図

混合物を使う。

廃棄物ボックスは、その頂部と底部にツイストロック式コーナーキャスティングを備え、運搬中の吊り上げ、積み重ね、および拘束を可能にしている。また、産業用パッケージ・タイプ2 (IP-2) の健全性要件を満たすように設計・試験されている。落下試験によって、事故時にコンクリート破片を保持するには非構造鋼製カラーが必要であることが示された。NIREX 社の設立までに、ボックスの設計と開

発、およびそれに伴う廃棄物梱包プラントのサイズ決めが完了した。将来の処分経路を確保するために、NIREX 社による WAGR ボックスの承認が求められ、同社から念書が得られた。

現在の管理体制では、元請業者が WAGR ボックスを提供する。これらのボックスは、定評のあるプレキャストコンクリート製造業者がサイト外部で製造する。

#### WAGR ILW ボックス貯蔵施設

WAGR 廃棄物容器は、その後、廃棄物経路 (B60) の封入プラントから少し離れた場所にある専用貯蔵施設 (B64) に貯蔵される。同施設は、矩形の平屋建屋であり、東側に車両乗り入れ場が付加されている。13×6列、3段で、最大234個の WAGR ボックスを貯蔵できる。床は、積み込みに対応できるように、格子状の場所打ち埋込コンクリート杭に支えられた厚さ 1.2m のいかだ基礎からなる。B64内での廃棄物ボックスの移動は、専用フォークリフト車で行なうが、B60から B64へ敷地内道路を輸送する場合は、別途専用のトレーラトラックを使用する。

廃棄物貯蔵施設は、空ボックス、満杯ボックス、およびフォークリフトトラックを風雨から防護し、施設外の人員に放射線防護を提供するように設計されている。ボックス取り扱い時のフォークリフトトラックの排気ガスから操作員を保護するために、換気系が組み込まれている。同施設を加熱する必要はないので、施設内の温度や湿度は制御されないが、その状態は監視されている。

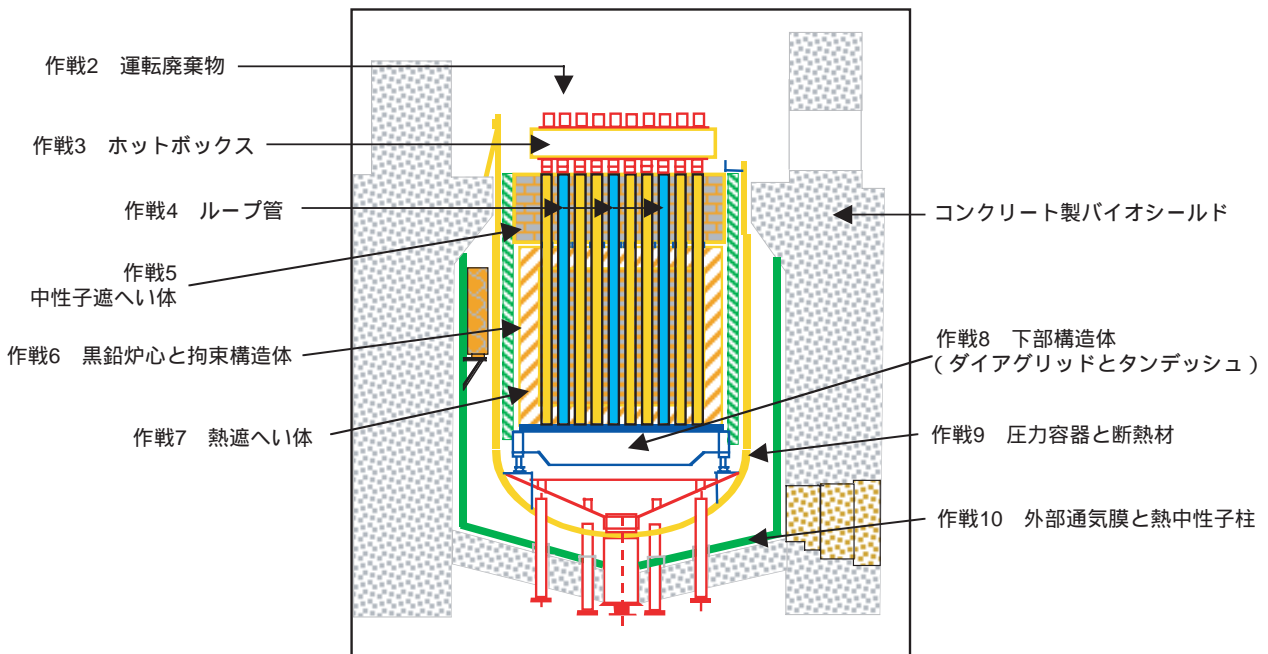


図5：解体作戦を示す、炉心・圧力容器の略図

## 管理体制

WAGR プロジェクトは、当初 UKAEA 内の研究開発プロジェクトとして始まったが、管理体制が次々と変更され、1998年に現在の組織となった。UKAEA は、施設許可取得者として、独自の安全運営・管理チームによって業務を管理および指示し、元請業者の BNFL エンバイロメンタル・サービズ社と契約し、工具や手法の開発と解体作業を行なう。

UKAEA と BNFL 社の契約は、責任の取引として構成されているが、基本的には固定価格契約である。BNFL 社は WAGR の解体を請け負い、UKAEA は、他の UKAEA 施設について BNFL 社が負う特定の責任を認める。これが現地で機能するうえで鍵となるのは、例えば機器の故障による作業の遅延の場合、各当事者がそれぞれの費用を負担することである。このために、両当事者は、問題に効率良く対処するための協力を促される。すなわち、BNFL 社が解決を図り、UKAEA が安全を確保し、安全手続きを管理する。

## 解体作戦

WAGR の解体は、10の作戦（図5）一式によって進行中である。それぞれの作戦は、下の表と後続セクションで詳述するように、炉心の特定部品に対応する。

### 作戦 2：運転廃棄物

運転廃棄物は、一般に、燃料ストリンガーの一部

である円筒形品目と、原子炉運転に伴う取り外し可能な品目から構成された。これらの品目は、燃料取り出しの一環として除去され、LLW 成分はドリッグにおいて処分された。これらのうち、ILW に分類される品目は、サイズを小さくし、吊り上げ用ピンテル（pintel）を取り付け、燃料チャンネルに戻して、廃炉を待った。

運転廃棄物は、以下の 8 種に分類された。

- ・アレスター（安全）機構：これは衝撃吸収装置であり、各燃料チャンネルの底部に装着されており、燃料交換中の事故の場合にチャンネルの損傷程度を抑えるためのものである。
- ・主制御棒：主制御棒は、原子炉の出力の粗調整と故障時の緊急停止に使われた。この制御棒を 4 つに切断した。ほとんどの制御棒の最上部は、LLW として処分できた。
- ・自動制御棒：自動制御棒は、薄壁ステンレス鋼管であり、原子炉ガス出口温度を「微調整」するため互いに独立に使われた。この制御棒を 4 つに切断して処分した。
- ・中性子遮へいプラグ：このプラグは、元々プラグストリンガーの底部に取り付けられ、中性子が原子炉チャンネルを上昇しないように設計されていた。中性子遮へいプラグは、2 つに切断して処分した。
- ・ブロッカー（フロー・レストリクター）：ブロッカーは、原子炉チャンネル中のガス流の上昇と、ガス流によるプラグストリンガーの振動を防ぐために使われた。ブロッカーは、中性子遮へいプラグの下位の損傷したチャンネルに取り付けられた。

作戦 1	予備操作：遠隔操作のためにホットボックス最上部を調整する制御された手作業。
作戦 2	燃料チャンネルからの運転廃棄物の取り外し。この作業の最初の部分は、発電所の安全性と運転性を立証するためのアクティブな試運転の演習に利用された。
作戦 3	ホットボックスの解体
作戦 4	ループ管の取り外し
作戦 5	中性子遮へい体の解体
作戦 6	黒鉛炉心と拘束構造体の取り外し
作戦 7	熱遮へい体の解体
作戦 8	小サイズ化と下部構造体（ダイアグリッドとタンデッシュ）の取り外し
作戦 9	小サイズ化と、圧力容器と断熱材の取り外し
作戦 10	小サイズ化と、外部通気膜と実験用熱中性子柱の取り外し。原子炉バイオシールドの最終浄化も。

- ・ 試料容器：この容器は、WAGR 以外から供給された試料を保持する。試料の照射効果を判定できるように原子炉に取り付けられた。
- ・ サンプルポット：WAGR の建設で使われた種々の材料サンプルが入っていた。
- ・ 廃棄物缶：運転品目の処理後に原子炉に蓄積した破片を収納するために使われた金属缶。

すべての品目の取り外しには、3 トン・ホイスト（図 6 参照）を使用した。リフティング・グラブは、各廃棄物に取り付けられたピンテルと噛み合うように設計された。各ボックスには、運転廃棄物 110 品目を収納する装備が含まれた。全部で 770 品目が原子炉から取り外された。有意な放射能があった一部の品目には、高密度ボックスを使用した。

操作チーム全体の被ばく線量は 3.72 人・mSv、最大個人線量は 0.53 mSv であった。

### 作戦 3：ホットボックス

ホットボックスは、高温冷却ガスを熱交換器へ迂回させるためのガスマニホールドとして使用された。これは、両端が平らな短い円筒形圧力容器であり、炭素鋼から作られた。直径約 5 m、高さ 1 m で、

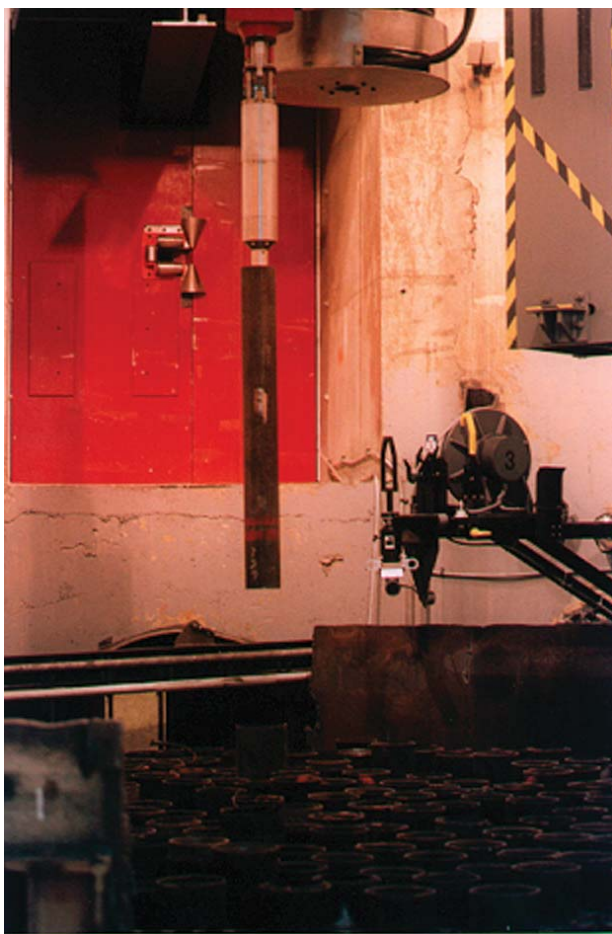


図 6：原子炉ドームのホットボックス上の 3 トン・ホイストに吊り下げられた運転廃棄物

ほぼ大型のピルボックスの形状であった。ホットボックスの内部は、断熱材でライニングされた。この断熱材は、ステンレス製フォイル（Refrasil®）のくぼみ付き層と平滑層の互層からなり、上板裏面と底板における厚さは、それぞれ約 19mm および 38mm であった。ボックス側壁には、厚さ約 25mm の断熱材が施された。ホットボックスには、ステンレス鋼製燃料エレメント案内管 253 本と炭素鋼製控え管 100 本も収納された。ホットボックスの重量は 31 トンであった。

小サイズ化のために採用された工業用プラズマアーク切断は、可能性のある方式のなかで最適であることが立証された。切断カーフによって発生する微粒子の量は、最小限である。ホットボックスは、手作業および遠隔リグで配置した 40～200 アンペアのプラズマトーチを使って、一連のミニ作戦によって解体した。

プラズマアーク切断が効果的であるためには、切断対象から一定の距離にカッターを維持する必要がある。ホットボックスの最上部に取り付けられた上部燃料交換管（URT）を取り外すための配置工具は、この管上に 3 本脚で立ち、プラズマトーチが中で吊り下げられるように設計された。このトーチは、垂直および放射方向に移動することによって、管フランジとホットボックス上板の間を切断するように設計された。操作中に、トーチを正確な距離に保って正しい部位を切断するのが非常に難しかった。このため、切断部が多数破損したり、トーチが損傷したりした。2 カ月間で 60 カ所を切断し、それに伴う被ばく線量は 8 人・mSv であった。安全性を十分検討した後、ボルトをパワーレンチで外すために人が立ち入ることにした。4 日間で残りの URT 129 本を取り外し、その間の被ばく線量は 9 人・mSv であった。

側壁の取り外しは、必ず管理された手作業で実施することになっていた。この理由は、主要な放射線源は燃料エレメント案内管（FEGT）であり、FEGT を取り外すと線量率が減少すると考えられたためである。しかし実際には、ホットボックス全内面に取り付けられた Refrasil 断熱材から線量が発生していたことがわかった。手作業による介入の余地を残すために、解体手順を変更し、側壁を取り外す前に下板から断熱材を剥ぎ取った。この作業は遠隔で行われ、リグ搭載プラズマトーチによって断熱材を分断してから、Slingsby マニピュレーターと 3 トン・ホイストから吊り下げられたグラブの組み合わせを用いて、分断片を隣接するバスケットに収納した。

これによって線量率が減少した後、手持ち式プラズマ切断によって側壁を取り除いた。最初に側壁の土台周辺を水平に切断し、複数の短いリガメントを後で切断するようにした。ボックスに梱包するため



図7：ホットボックス側壁板の手持ち式プラズマ切断

に側壁を適当な長さに分割する縦切りをすべて行い、安定を保つために1本のリガメントを残した。操作員は、外側から切断することにより、厚さ25mmの軟鋼側壁板(図7)による遮へい効果を得た。切断片に3トン・ホイストを取り付け、制御された立ち入りによってリガメントを切り離すことによって、最終的な取り外しを行った。吊り上げる前に、操作員はこの区域から退出した。残りの切断部については、移動遮へい板を使って、残存する側壁の露出端から操作員を防護した。

さらに手動介入があったにもかかわらず、総線量は55.6人・mSvであり、65.5人・mSvの予定線量内に収まり、最大個人線量は2.7mSvであった。

廃棄物は、通常密度のボックス14個に梱包し、LLWとして処分するためにドリッグへ移送された。この作戦は13カ月を要した。

#### 作戦4：ループ管

ループ管は6本あり、HP1、HP2、A、B、D、Eと呼ばれている。これらのループ管は、燃料実験を行なうために使用された6本の実験用燃料チャンネルである。いずれのループ管も、加工硬化ステンレス鋼から作られた。

これらのループ管は、原子炉の寿命期間中、炉心に取り付けられ、かなりの放射能を帯び、中央部の線量率は120 Sv/hに達した可能性がある。原子炉周辺にこのような放射性物質の破片が拡散するのを

防ぐために、ガス切断やガス切りではなく、油圧せん断による小サイズ化を選んだ。ループ管がせん断刃に挟まれる危険性を最小限に抑え、切断手順をより効率的にするために、管に高密度のセメントグラウトを充填した。クリプト(地下室)と呼ばれる最下部パイオシールドの下位領域にある6本のループ管の底部に、グラウトコネクタを取り付けなければならなかった(図8参照)。この領域では、線量率が局所的に1 mSvに達していたので、作業が確実にALARA(合理的に達成可能なかぎり低く)になるよう原寸模型を作り、予行演習を行った。グラウトは移動プラントで混合し、格納

容器建屋へ移送し、高さ14mの管に注入した。この作業は1週間未満で完了した。

せん断機3品目は、完全な遠隔操作で原子炉ドームに設置されるように設計された。まず、ループ管が炉心に落下するのを防ぐためにレイジーカムを使ったフェイルセーフ管クランプ(FSTC)を、ループ管直上の中性子遮へい体の上に置いた。次に、FSTCの上部にループ管吊り上げ装置(LTLD)を載せた。LTLDは、カムと圧縮空気シリンダにより、ループ管を100mmずつ吊り上げた。ループ管は、3トン・ホイストから吊り下げられたボールグラブを用いて、FSTCとLTLDを通して吊り上げた。ループ管が安全に支持された後、ホイストを使ってせん断機本体を配置した。



図8：技師が、グラウト接続パイプを原子炉下の地下室にあるループ管下端に取り付けている。

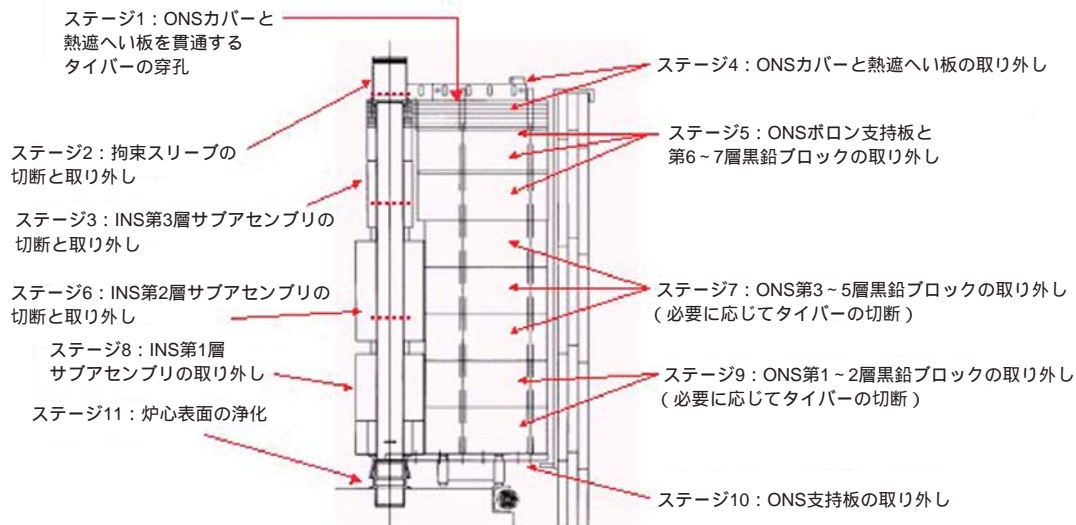


図9：中性子遮へい体取り外しの11ステージ

ループ管をせん断刃の上に1.1m突き出し、クレーンをこの管に接続させ、750トンのせん断力で管を切断することによって小サイズ化を行なった。切断のたびに、切断片をホイストで運んで分析評価し、高密度ボックスに梱包した。特殊設計の備品を使って、ループ管のなかで最も放射能が強い部分を、ボックスの中央に配置した。各ボックスにループ管1本を詰めた。

非常に放射能の強い破片がせん断機にあるかもしれないので、せん断機も LLW として封入した。支持棒は、ピンで留めた継手で組み立てられたので、マニピュレーターにより WAGR ボックスに収まるよう寸法を縮小できた。

この作戦は大成功を収め、3カ月半しかかからず、グラウトの養生期間がその大部分を占めた。せん断機は完全に遠隔で設置でき、最初の設置のために使用されたが、せん断機への6本の供給線の接続は手動で行った。この作業によって線量はほとんど増えなかったが、時間が短縮され、マニピュレーターを使うことによるプラグやソケットの損傷を回避できた。

この作戦による総線量は8.3人-mSvであり、15.7人-mSvの予定線量内に収まって完了した。最大個人線量は1.0mSvであった。

#### 作戦5：中性子遮へい体

中性子遮へい体廃棄物は、黒鉛、ステンレス鋼、軟鋼など、多数の異なる材料からなる。中性子遮へい体は、実質的に、内部遮へい体と外部遮へい体という2つの主要部から構成されている。内部中性子遮へい体（INS）には、原子炉上部燃料チャンネル部分が含まれており、黒鉛ブロックに囲まれたステンレス鋼案内管からなる。外部中性子遮へい体

（ONS）にはチャンネル部がなく、実質的には、主としてINSを囲む多数の黒鉛固体ブロックからなる。中性子遮へい体には約2,300個の部品があり、その重量は80トンを超えた。

中性子遮へい体の大半はLLWとして引き渡され、ステンレス鋼案内管の入った黒鉛部分のみがILWとして処分された。

中性子遮へい体は、一連の11のミニ作戦によって取り外され、作戦は2002年4月に完了した。

ステージ1は、ONS周辺の熱遮へい板96枚を取り外す段階であり、当初、遠隔操作の予定であった。この作業は、完了するのに約1,250件の活動と約38の交替勤務が必要と考えられた。この区域の線量率は予想より低かったため（一般に100～200μSv/h）、このプロジェクトは制御された手作業として行われ、熱遮へい板を通してタイバーを穿孔することによって作業を完了した。この手作業は、わずか5交替で完了した。

ステージ2は、拘束スリーブの小サイズ化であり、2層の黒鉛ブロックを各ボックスに梱包できるようにするために必要な段階である。元請業者は、遠隔配置に適した内部パイプフライス盤を調達した。このフライス盤を試用したところ、切断チップあたり40カットという約束された性能を果たせず、チップあたりわずか10カットであった。原子炉に配置したとき、1カットしか実現できず、低速カッターは管を回転させる傾向があった。これは、工具開発のときに予測していなかったことである。プロジェクト作業員は、遅れを避けるために、代替の解決策を開発しつつ、このフライス盤に粘り強く取り組んだ。線量率が低かったため、改造100mmアングルグラインダーを使った手作業により、鋼製燃料チャンネルを切断した。このグラインダーは、1時間あたり



6カットを越える生産速度を実現している。グラインダーの製造コストは4,000ポンド（6,200米ドル）であり、当初の機械だと10万ポンド（15万6,000米ドル）も要した。

ステージ3においても、同じ手動操作のグラインダーを拡張使用して、最上層黒鉛中のライナー管を切断した。次に、3メートル・ホイストから吊り下げられた特殊設計の複動ボールグラブにより、ブロックとライナーの双方を取り外し、廃棄物バスケットボックス装備に入れた。1ボックスあたり60個のブロックを詰めた。1層に253個のブロックが含まれた。

ステージ4では、ステージ1で解除したONS板の取り外しを行なった。3トン・ホイストの下に配置された2点磁気グラブにより、この板を取り外し、バスケットへ移送した。

ステージ5では、独立型シングルパッド・バキュームグラブを使い、ONSから厚さ3mmのボロン鋼板を取り外した。この後、2層のONS黒鉛ブロックを取り外した。この固体ブロックには、吊り上げ機能がなかった。そこで、黒鉛最上部に穴を3カ所開け、ねじ山を切り、ブロックにボルト留めするための工具を開発した。特殊なボルトピットを用いて、これを1回の動作で実現した。ブロックを廃棄物バスケットへ移送した後、モータを逆転させてブロックを解除した。

ステージ6は、ステージ3の繰り返しであったが、遠隔作業で実施しなければならない程に線量率が高くなった。これは予想されたことであり、介入期間に、ステージ3での手作業を動力化するために第2の改造グラインダーを開発した。3トン・ホイストの上に配置されたこのグラインダーを使用して、第2層黒鉛内のライナー管を切断した。それから、ステージ3と同様にブロックは取り外された。

ステージ7は、ステージ5の繰り返しであり、ONS黒鉛ブロックの各層を取り外した。各層を取り外した際に、独立型油圧せん断機を用いて、次の層の表面付近にある96本のタイバーを切断した。

ステージ8では、ボールグラブを使い、黒鉛の底層を取り外した。プロジェクトのこの時点で、Schilling マニピュレーターを配置しなければならない。このマニピュレーターには、中性子遮へい体を炉心に接続するステンレス鋼ソケットに付いている多数の熱電対線を切断するための、せん断・グリッパー複合工具が装備されている。

ステージ9では、ステージ5および7と同様に、ONSの最後の層を取り除いた。

ステージ10では、磁気グラブを使って支持板を取り外した。

最後にステージ11では、マニピュレーターを使っ

て、新たに露出した炉心表面を浄化した。これで、次の作戦の準備が整った（図9参照）。

夏に、90トンの黒鉛と鋼を取り外し、WAGRボックス32個に梱包した（LLW22個、ILW10個）。この作業は予定より6カ月早く終了した。総被ばく線量は17人-SmVであり、43人-SmVの予定線量内に収まった。

#### 作戦6：黒鉛炉心と拘束構造体

黒鉛炉心は、8層200トンの黒鉛ブロックからなる。各層には、直径約5m、深さ800mmの平型円筒形の黒鉛反射体に囲まれた253個の燃料チャンネルブロックが含まれている。各層は、反射体最上部の円周付近の溝に入った張力鋼桁で拘束されている。WAGR炉心は重装備であり、黒鉛ブロックが多数の熱電対線や線束走査管と絡み合っている。

中性子遮へい体の取り外しで使われる工具の多くが、炉心の取り外しにも使われる。これには、ボールグラブ、穿孔工具、および熱電対や線束走査管の取り外しのために種々の工具を装備したマニピュレーターが含まれる。

この2つの作戦間の最も大きな違いは、拘束梁の切断である。この切断は、遠隔配置されたフレームに搭載された、工業用標準タイプの往復ノコを使って行なった。このノコには、刃を前進させるためのモータ装置が別途装着された。すべての機器を試験するために、炉心の4分の1部分の原寸模型を組み立てた。試験を通じて、拘束梁の各部材が破壊点に近づくと、移動してノコの刃を挟む傾向があり、そのため刃が折れることがわかった。ノコ切断が終了するまで部材を定置

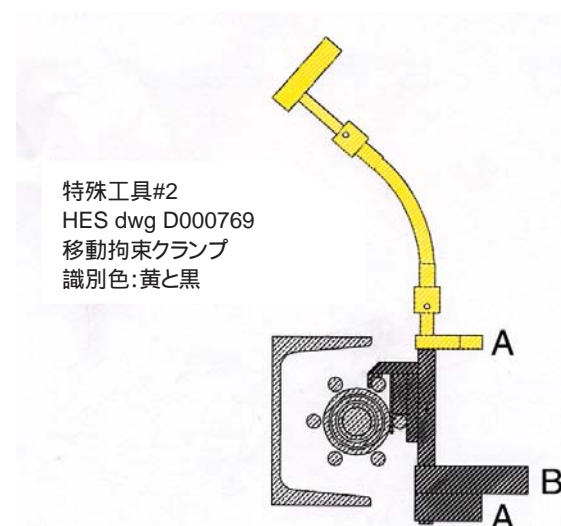


図10：切断中、炉心拘束梁の引張部材を支持するのに使われるクランプの1つ。最終配置されると、Aがチャンネルフランジを保持し、Bが引張部材を支える。

に固定するために、遠隔配置されるクランプを設計した。

各梁を12部分に切断したが、各切断部にクランプ3個を必要とした。第1クランプによって、切断後に拘束梁がチャンネル部ハウジングから揺れ出ないようにした。第2クランプ(図10)によって、切断中に拘束梁を保持・支持し、ノコ刃が挟まれないようにした。第3クランプによって、炉心と熱遮へい体の隙間に拘束梁全体が落下するのを防いだ。当初、これらのクランプの取り付けが難しいことがわかったが、経験を積んだ結果、作業が洗練され、現在では日常業務となっている。これは、今日までの進捗状況に表されている。最初のボックス10個は13週間で完了したが、残りのボックス13個はわずか7週間で完了した。

燃料チャンネルブロックは、黒鉛スピゴットリングと一緒に置かれていた。ボックスに最大限詰め込むには、これらのブロックやリングを取り外さなければならないが、予想以上に取り外しが難しいことがわかった。ブロック底部に固着するスピゴットリングは、専用のプラーピンの中で取り外された。スピゴットリングが、それを掴む外部ポールグラブの中に入るように、ブロックがピンの上で下ろされる。ブロックが引き上げられると、スピゴットリングはプラーピンの中に残される。このピンに向かう次のブロックがポールグラブを介してスピゴットリングを押し出し、ピンに入れる。ピンで回収されたリングをバスケットに放出して、封入することができる。ブロック最上部に固着するスピゴットリングは、Schilling マニピュレーターを使って引き抜く。この作業は、多数のリングが破損して厄介であり、望まれるクリアランスを得るには、その後サイズを小さくしなければならない。

原子炉ドーム内の線量率は、黒鉛炉心が取り外された後、2桁以上増加した。工具交換のためこれまで立ち入り可能だった区域では、線量が30～40mSv/hになり、露出した炉心構成物との接触部の線量は約500mSv/hになった。このため、人の立ち入りはもはや許可されない。これが、線量増加に有意な影響を与えている。現在の予測では、全作戦が完了するときの総線量は10人・mSv未満となり、35人・mSvの予定線量内に収まる。

様々な難題はあったものの、進捗状況は目覚ましく、作戦を開始してから4カ月以内で最初の3層を取り外した。18カ月間の予定計画を、11カ月または12カ月に短縮できる期待が生まれている。

#### 作戦7～10

今後の作戦のための工具や手法の開発が進んでおり、今後の記事で取り扱う。

## 将来の戦略

廃炉の現段階が完了した後のWAGR施設の解体オプションについて検討するために、一連の調査が始まろうとしている。炉心のコンクリート製バイオシールドのトリチウム放射化のため、現在は、2040年まで解体を延期する戦略がとられている。しかし、(a)全施設を即時解体することと、(b)建物を解体しつつバイオシールドを保護して後に取り外すことを含めた、他の一連のオプションも検討される。

## まとめ

WAGRの廃炉は、発電炉を閉鎖直後に廃炉にできることを立証するために行われている。炉心や圧力容器の取り外し作業は、特定の炉心構造物の取り外しを含む一連の10作戦に分けられた。最初の5作戦が完了し、6番目の作戦である黒鉛炉心の取り外しは、予定より6カ月早く進められている(図11参照)。プロジェクトの完了は、2006年春の予定である。

解体手法と工具は、作戦ごとに特別に開発されてきた。原寸模型を使って、工具の試験と操作員の訓練を行い、作業期間を見積もった。試験では成功したものの、実際の使用において、一部の工具が所定の性能を示さないことがわかった。このような場合、簡単な工具細工と手作業によって、プロジェクトを予定に先行させ、予定線量以内に線量を保った。今後の作戦に備え、高線量率のために手作業が不可能な場合について、元請業者は、各作業のリスク評価を行い、最も可能性の高いリスクに対処するために種々の工具を開発することにした。この戦略では、利用しないかもしれない工具のコストが発生するが、このようなコストは、今後予想される作業の遅れにかかるコストに比べると微々たるものである。

計画が非常にうまく進展していることには、管理体制が寄与している。UKAEAと元請業者の協力関係は、問題を早期に発見し、迅速かつ効果的に対処できるようになっている。

WAGRプロジェクトは、現在、UKAEAスタッフや元請業者作業員に時間損失をもたらす事故も発生せず、6年間以上継続している。過去12ヶ月間の最大個人被ばく線量は、2.0 mSv未満であった。

炉心と圧力容器の取り外しは、現段階では、予定より6カ月早く終了することになっている。

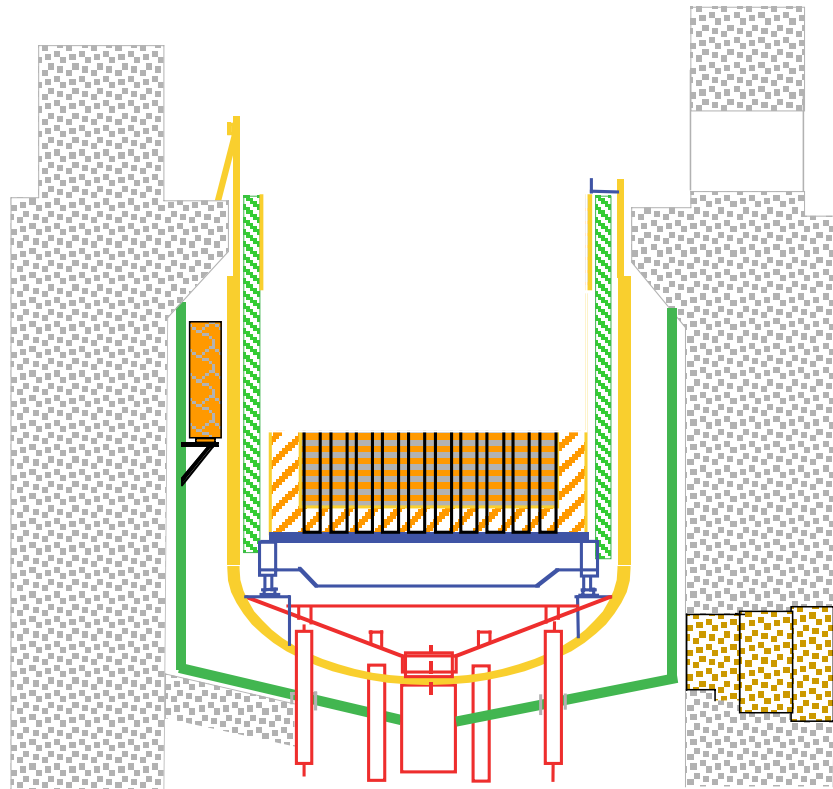


図11 : 2002年10月現在の進捗状況を示す修正後略図

テリー・ベネスト氏は、UKAEA の WAGR 廃炉プロジェクト担当責任者である。ミシェル・ワイス氏は、UKAEA 廃棄物・環境技術部部長である。

UKAEA の廃棄物管理・廃炉計画の資金は、英国

貿易産業省が拠出している。原子力産業界は、マグノックス・ジェネレーションを通じて追加資金を拠出している。