

<概要>

発電用原子炉は、1990年から2014年1月までにパイロットプラントを含め、世界で147基閉鎖された。そのうち75基が軽水炉、34基がガス炉であった。米国、ドイツ、フランス等では原子炉閉鎖後に解体を開始する時期を早める傾向にある。これは、除染技術の向上、解体技術の向上により作業者の被ばくの低減、コスト低減が可能になったことが寄与している。ここでは、廃止措置にかかわる施設特性、機器・系統除染、原子炉本体解体、生体遮へい体解体、汚染コンクリート除去及び遠隔解体技術について述べる。

<更新年月>

2014年02月

<本文>

発電用原子炉の閉鎖炉は、2006年3月までにパイロットプラントを含め世界で147基である。その主な内訳は軽水炉75基、ガス炉（GCR）36基、重水減速炉12基、黒鉛減速沸騰水冷却型炉（RBMK）9基、高速増殖炉（FBR）8基である。2000年以降で約56基が閉鎖された。

1. 施設特性

原子炉の廃止措置にかかわる主要な施設特性として放射能インベントリが挙げられるが、これは炉型、運転履歴などに応じて施設ごとに大きく異なっている。対象施設の特性を正しく知ることは、(1) 作業者の被ばく及び公衆への影響評価、(2) 廃止措置（デコミッションング）方式の選択、(3) 具体的な解体工法及び時期の選択を行う上で重要である。

1.1 軽水炉の施設特性と解体時期の選択

大型（100万kWe級）の発電炉を40年間運転した場合、放射能の強さは、原子炉停止後 10^{17} ベクレル（Bq）程度になる。その放射能インベントリは、原子炉停止後、中性子束レベルの高い炉内構造物に集中し、原子炉圧力容器、生体遮へい体などで99.9%以上を占める。また、機器、配管には、腐食生成物などの汚染物が付着し、その量は0.1%程度である。

BWR炉内構造物における残留放射能と線量率の時間的変化の評価例を図1に示す。残留放射能の核種は、炉停止10年後まで ^{55}Fe 、続いて ^{60}Co が支配的であり、それ以後は ^{63}Ni である。炉内線量率は、半減期約5年の ^{60}Co が支配的であり、停止40年後で1/100、90年後まで続く。その後は、半減期が約2万年の ^{94}Nb が支配的になる。

軽水炉の場合、かつては放射能の減衰を待つ20～30年間安全貯蔵した後に本格解体を開始し、作業者の被ばくを低減させる方式が採られていたが、原子炉冷却系の系統除染技術の向上、遠隔解体技術の進展により即時解体が可能となった。米国では、原子炉圧力容器等を一括撤去する方式で、即時解体を実施している。また、ドイツも即時解体を実施しており、炉内構造物、原子炉圧力容器を水中切断により解体撤去する方法、あるいは原子炉圧力容器等を一括撤去する方法を採用している。

1.2 ガス炉の施設特性と原子炉本体解体時期の選択

商業用炭酸ガス冷却炉（マグノックス型：GCR）の場合、原子炉停止後の炉内線量率は時間経過とともに図2に示すように変化する。この図から、 ^{60}Co 、 $^{108\text{m}}\text{Ag}$ 、 ^{94}Nb の3核種が炉内線量率に寄与し、約135年後は $^{108\text{m}}\text{Ag}$ と ^{94}Nb が支配的になることが分かる。

イギリスではガス炉の廃止措置において、原子炉本体のみ長期安全貯蔵し、原子炉本体部分を残した形でのサイト解放に向けて解体撤去作業が進んでいる。ガス炉は軽水炉に比べて、物量が多く、炉内線量率が極めて低く、その低下速度も緩やかである。そこで、原子炉本体を長期安全貯蔵後に解体する方式を採用している。最近の評価では、原子炉本体の解体時期は、作業者の被

ばく線量を2mSv/年、作業者が遠隔装置を用いずに作業できる時間（40時/人/週）と仮定して、停止後85年である（詳細はATOMICAデータ「英国における原子力発電所廃止措置計画（05-02-03-05）」を参照）。

フランス、スペイン等では、まず原子炉周辺機器を撤去し、原子炉本体のみ隔離遮へいし、原子炉本体は約40年間安全貯蔵後に解体する戦略を採っていた。しかし、フランスでは、規制当局から長期保管に伴い当該原子炉に関する情報喪失の**リスク**が指摘され、さらに将来のサイト再利用も考慮し、早期解体の方針に転換しつつある。フランス電力公社（EDF）は、GCR型原子炉6基を含む第1世代の発電炉（8基）を2025年までに解体撤去を完了させる計画を2001年に公表した。軽水炉（ショウ-A）の解体は、2009年から開始され、2014年頃から炉内構造物、原子炉圧力容器を機械的切断方法で解体する準備が進められている。

2. 機器、系統除染技術

軽水炉等の解体では、まず、解体を容易にするために原位置での機器、系統除染を行うのが一般的である。これまでに各種除染方法が開発され、最近、有効性が示されているものにCORD法、**DFD法**がある。諸外国の最近の廃止措置に即時解体が多くなった技術的背景の一つにこの除染技術の確立があげられる（詳細はATOMICAデータ「解体関連除染技術（05-02-02-04）」を参照）。

HP/CORD D UV法（酸化/還元溶解除染法の一つ）は、ステンレス鋼等のクロム（Cr）を含む材料のCr系酸化膜を過マンガン酸（HMnO₄）により酸化反応で溶解し、また、Fe系酸化皮膜をシュウ酸により還元反応で溶解する化学除染法であり、高い除染効果が得られる。この除染法では、過酸化水素及び紫外線照射により添加したシュウ酸を炭酸ガスと水に分解し、2次廃棄物の発生量を少なくする工夫がなされている。

DFD法は、Fe系酸化物、母材をフッ化ホウ素酸（HBF₄）で溶解し、過マンガン酸カリウム（KMnO₄）でCr系酸化物を溶解する化学除染法であり、高い除染効果が得られる。これは英国のBradtec社と米国電力研究所が開発した方法である。これまでにメイン・ヤンキー炉（DF：31）、ビックロックポイント（DF：27）で実施し、良い結果を得ている。（DFは除染係数で「除染前の線量率/除染後の線量率」と定義される。例えば、DF=31の場合には除染後の線量率が除染前と比べて31分の1まで減少したことを意味する。）

3. 大型機器の解体撤去、リサイクルまたは一括処分

原子炉施設の汚染機器である**蒸気発生器**、加熱器、主冷却用ポンプは、密閉し、機器ごと撤去・処分する場合と切断する場合がある。汚染レベルが低い機器については、除染してその解体材料をリサイクルに回すことも行われている。これらの例を表1に示す。米国のメイン・ヤンキー炉、フランスのG2及びG3炉、ドイツのグンドレミンゲン炉では、細断後に熔融し、遮へいブロック等にリサイクルされている。また、米国のトロージャン炉、イギリスのWAGR炉は、密閉後に軽量コンクリート・モルタルを充填、**固化**し、処分場に運搬し、一括処分されている。

4. 原子炉本体解体方法

原子炉本体の解体で考慮することは、第1に炉内構造物、厚肉の構造物である原子炉圧力容器の順に放射能レベルが高く、特に炉内構造物に放射能が集中していることである。第2にその周囲にある極めて堅牢な鉄筋コンクリートの生体遮へい体が**放射化**していることである。炉心部の解体方法は、細かく切断する解体と一括撤去に区分される（表2）。

4.1 原子炉一括撤去工法

米国、ドイツでの原子炉圧力容器等の一括撤去工法の実績を表3に示す。研究用原子炉旧JRR-3炉体（重量2200トン）の一括撤去工事は、世界初であり、1986年に行われた。この撤去工事での作業者の被ばく線量は、無視できる程度であった。

その後、米国の SHIPPING PORT 炉では、1989年、原子炉圧力容器の周りにコンクリート製の遮へい体を取り付け、その容器と炉内構造物を一体化し、処分場に輸送し処分した。この工事での作業者の被ばく線量は、0.18人・Sv、コスト10.3百万ドルであった。

トロージャン炉では、炉内構造物を含む原子炉圧力容器の一括撤去工事が1999年に行われ、原子炉圧力容器パッケージを廃棄物処分場まで輸送し、処分された。このプロジェクトに対し、2000年、世界のプロジェクト管理協会からプロジェクト管理賞が与えられた。これは、既存の技術を用い、被ばく線量が0.67人・Svと低く、コストも22百万ドルと低く、廃棄物量も少ない点が評価された（ATOMICAデータ「トロージャン原子炉の廃止措置（05-02-03-16）」を参照）。

また、メイン・ヤンキー、サンオノフレ1号機、ビック・ロック・ポイント、コネチカット・ヤンキーの4基では、処分場の要求から高β廃棄物（GTCC：米国の廃棄物処分基準クラスC以上）を除く条件で原子炉圧力容器を一括撤去工法によって2001年から2004年の間に撤去処分した（[図3](#)参照）。メイン・ヤンキー炉では、バーンウェル処分場の受け入れ基準5万Ci以下を満たすため、炉内構造物を2/3（127トン）に制限し、断熱材（3トン）を含む原子炉圧力容器パッケージ

917トンの撤去、輸送・処分を2003年5月に実施した。

ドイツのグライフスバルト原子力発電所（5基）では原子炉圧力容器一括撤去方式が採用され、現在、中間貯蔵施設に保管されている。

4.2 炉内構造物及び原子炉圧力容器の切断工法

炉内構造物の切断工法とその実施例を表4に示す。放射能レベルの最も高い炉内構造物を、熱的切断工法により細かく解体し、撤去した例として米国のエリック・リバー（ERR）、日本のJPDR等の実績がある。JPDRでは、遠隔技術による水中プラズマアーク切断が用いられた。また、ベルギーのBR-3では、二次廃棄物の処理等が有利であるとして主に機械的切断工法を用いて行われた。

原子炉圧力容器の切断工法とその実施及び計画例を表5に示す。110万kW級原子炉の圧力容器は、重量400トン（PWR型）から800トン（BWR型）、それぞれの胴部の厚さは230mm、170mmもあり、最も解体が困難な構造物の一つである。JPDRでは、回転ブレードを有するアークソーで切断している（文献2）。表5は、1991年に米国のアルゴンヌ研究所が評価したもので、その当時は、熱的切断工法が上位にランクされていた。ベルギーのBR-3では、図4に示す回転ソーでリング状に切断、さらにバンドソーを用いて細断作業が2000年に行われた。ドイツの多目的原子炉MZFRでは、図5に示すように原子炉圧力容器下部をリング状にガス切断し、そのリングの細断にはジグソー（Jig saw）を用いる。水中での各種機械的及び熱的切断方法での比較データを表6に示す。

グライフスバルト原子力発電所サイトでは、5基（旧ソ連型PWR、44万kW/基）を順次、解体する世界最大のプロジェクトが進められている。その解体のための用推奨工法を表7に示す。この表にみられるように、熱的切断工法をできるだけ減らし、機械的切断（バンドソー等）が多く用いられる方針が採られている。最近の技術開発により、二次廃棄物の回収、処理等のしやすさから機械的切断工法が鋼構造物の解体に多く用いられる傾向にある。

5. 生体遮へい体の解体工法

原子炉施設のコンクリート構造物の解体技術は、破碎工法（制御爆破、ブレーカ等）、ブロック切断工法（ダイヤモンドブレード、ワイヤーソー等）及び表面除染を目的とする表面剥離工法（スキャブラ法**、ブラスト法、シェーバ法等）に区分される。

鉄筋コンクリート構造物である生体遮へい体の解体工法は、表8に示すように各種の工法が開発され用いられている。

破碎する工法は、衝撃力を利用するジャイアント・ブレーカなどで能率が高いが、騒音、振動、粉塵が発生する。この工法は、汚染レベルの低い部分での使用が一般的である。また、JPDRでは、解体効率の高い制御爆破工法を生体遮へい体の放射能レベルの低い部分の解体に用い、効率的であることを実証した。

放射能レベルの高い部分の解体等には、大きなブロック状に解体する工法が合理的である。米国の高温ガス炉では、生体遮へいの内側をダイヤモンド・ワイヤーソーによりブロック状にして撤去した実施例がある（図6参照）。

**スキャブラ法とは、タングステン炭化物（WC）チップを先端につけたビットを圧縮空気ですべてに往復運動させて、コンクリート面を打撃し汚染した表層部を削り取る方法。

6. 汚染コンクリートの除去

コンクリート表面剥離技術は、汚染コンクリートの表面を剥離し、コンクリート躯体を非放射性解体物して取扱うことができるようにするための重要な技術である。JPDRの場合、汚染水によるコンクリートへの浸透深さは、⁶⁰Coで数ミリ、¹³⁷Csで10数ミリ以内である。このような施設ごとの特性を考慮して剥離すれば効率的に汚染コンクリートを分離できる。

コンクリートの床除染について、米国DOEはスキャブラ法、ブラスト法及びドライアイス・ブラスト法を比較試験して評価している。現状ではスキャブラ法が総合的に優れていると評価されたが、ドライアイス・ブラスト法も効率的で二次廃棄物の発生量が少なく、遠隔作業が可能であり、コスト低減の課題を克服すれば有望であるとしている。

また、汚染コンクリート、セラミックタイル及び各種塗装の除去にドライアイス・レーザビーム剥離法（Dryice Laserbeam Stripping）がドイツで開発された。その除去効率は、コンクリート開削深さ5mm、セラミックタイル3mm対して、それぞれ1600cm³/hr、650cm³/hrである。ハンド・スキャブラー等との比較を表9に示す。

7. 遠隔解体技術

原子炉本体部分を解体するには、放射能レベルが高いためマスト型またはマニピュレータ型の遠隔装置が用いられる。これらの装置には、4.2で述べたように対象物に適合した切断冶具が取り付けられる。WAGRの解体作業では、原子炉上部に遠隔解体装置を設置し、対象物に合わせて各種の切断冶具を取替え、作業が進められている。各原子炉施設の遠隔解体技術を表10に示す。

JPDRのマスト型遠隔解体システムを図7に、また、ランチョ・セコの研磨剤入り超高压水ジェットによる原子炉圧力容器の解体工法を図8に示す。わが国では、現在、東海発電所の解体に備えて解体装置の開発が進められている（詳細はATOMICAデータ「ロボットによる遠隔解体（05-02-02-03）」を参照）。

また、大事故を起こしたチェルノブイリ4号炉の石棺の改修及び溶融物の除去が検討されている。この作業に米国のモービル除染/解体作業システム（Rosie）などが用いられる。
（前回更新：2007年2月）

<関連タイトル>

- 鋼構造物の解体技術 (05-02-02-01)
- ロボットによる遠隔解体技術 (05-02-02-03)
- 解体関連除染技術 (05-02-02-04)
- 英国WAGRの解体 (05-02-03-10)
- トロージャン原子炉の廃止措置 (05-02-03-16)

<参考文献>

- (1) 宮坂 靖彦：原子炉施設デコミッションングにおける最近の解体技術動向、デコミッションング技報 第25号、p.36-51（2002年3月）
 - (2) 日本原子力産業会議（編）：原子力ポケットブック、原子力産業会議 2006年版（2006年8月）
 - (3) 宮坂 靖彦ほか：JPDR解体実地試験の概要と成果、原子力学会誌、Vol.38、No.7、p.553-576（1996）
 - (4) D. Kovan: Windscale - core decommissioning goes active, Nucl. Eng. International, Feb. 2000
 - (5) Dean M. Wheeler at al., Large Component Removal/Disposal, WM'02 Conf. Tucson, AZ（2002）
 - (6) 原子炉デコミッションングハンドブック、サイエンスフォーラム、p.99-106
 - (7) Geoff Holt, John C Lee, Paul B Woollam, Experience in Decommissioning Commercial Nuclear Power Station in the UK, DD&R Nov.10-14 1996, p.72-76
 - (8) J. Dadoumont, et. al., Dismantling of the BR-3 Reactor Pressure Vessel, ICEM'01, Sep.30-Oct.4, 2001, Bruges, Belgium
 - (9) Fort St Vrain: the end of the licence, Nuclear Eng. Inter., Nov. 1997
 - (10) W. Demant, et. al. Dismantling and Segmentation of RPV and Internals of the Research Reactor MZFR Karlsruhe, Germany, WM'99, Feb. 28-Mar. 4 1999
 - (11) 宮坂 靖彦：米国の発電用原子炉デコミッションングの最新動向、デコミッションング技報第21号（2000年3月）
 - (12) Ralf Borchardt, Jurgen Raasch: Results of the Full Scale Testing of the Remote Dismantling in Greifswald NPP, ICEM03-4777（2003）.
 - (13) R.Verseman, F.W.Bach, G.Kremer, P.Bruggeman: Research and Development Results for Dismantling and Decontamination Application, WM'05（2005）.
 - (14) ANS NEWSLETTER 2002, 2003, 2004, 2005, 2006.
 - (15) Equipment Overview,
 - (16) Andreas Ehlert,"Best Practice in E.ON Decommissioning Projects",
<http://www.iaea.org/>.
 - (17) Holger Spann "Reactor Reactor Vessel and Reactor Vessel Internals Segmentation at Zion Nuclear Power Station" KONTEC 2013.
-

表1 汚染している大型機器の撤去、処分およびリサイクル

原子炉施設名	炉型/出力 (万kW)	機器/重量 (t)	撤去、処分、又はリサイクル
G2/G3	GCR/4	SG	施設内で切断後、SOCODEI処理センターに輸 送・溶融処理、リサイクル
WAGR	AGR/3.6	SG/190	大型クレーンによる撤去後、ドリック処分場に 輸送、埋設
グンドレミンゲン	BWR/25.2	2次SG	水張り後凍結させ、バンドソーで切断、除染溶 融処理後、インゴットのリサイクル
ヤンキー・ロー	PWR/18.5	SG Prz	軽量コンクリート・モルタル充填後、バーンウェ ル処分場に輸送、処分
トロージャン	PWR/118	SG Prz	軽量コンクリート・モルタル充填後、ハンフォード 処分場に輸送、処分
メイン・ヤンキー	PWR/90	SG/356 Prz/100	Duratek社の処理場に輸送、解体後溶融、遮へい ブロック製造
コネチカット・ ヤンキー	PWR/60	SG Prz ポンプ	SGは上、下に分割。上部胴はDuratek社の処理 場に輸送、解体後溶融、遮へいブロック製造。 下部は汚染レベルが高くバーンウェル処分場 に輸送、処分。Prz及びポンプはエンバエロケ ア処分場に輸送、処分

SG:蒸気発生器 Prz:加熱器

下記の出典をもとに作成した。

- [出典](1) 宮坂 靖彦:原子炉施設デコミッショニングにおける最近の解体技術動向、
デコミッショニング技報 第25号、p.36-51(2002年3月)
- (2) D. Kovan: Windscale- core decommissioning goes active, Nucl. Eng.
International, Feb. 2000
- (3) Dean M. Wheeler at al., Large Component Removal/Disposal, WM'02
Conf. Tucson, AZ (2002)
- (4) 宮坂 靖彦:米国の発電用原子炉デコミッショニングの最新動向、
デコミッショニング技報第21号(2000年3月)

表2 原子炉本体等の解体撤去工法の適用例等

工法区分	軽水炉等		ガス炉、重水炉		試験・研究炉	
	実施経験	実施中	実施経験	実施中	実施経験	実施中
解体(小片、切断)	<ul style="list-style-type: none"> ・ERR(米) ・JPDR(日) ・BR-3(ベルギー) ・KRB-A(独) ・シュターデ(独) ・ヴェルガッセン(独) ・ランチョ・セコ(独) 	ザイオン(米) 1号機、2号機 ショウーA(仏)	<ul style="list-style-type: none"> ・WAGR(英) ・MZFR(独) 	<ul style="list-style-type: none"> ・東海発電所(日) ・EL-4(仏) 	<ul style="list-style-type: none"> ・KKN(独) ・GTRR(米) ・CP-5(米) ・FRJ-1(独) ・DIORIT(スイス) 	<ul style="list-style-type: none"> ・KNK(独)
一括撤去 (原子炉容器等)	<ul style="list-style-type: none"> ・ヤンキーロー(米) ・コネッチカットヤンキー(米) ・メインヤンキー(米) ・ビックロックポイント(米) ・サンオノフレ(米) ・グライスバルト(5基)(独) ・ラインスベルク(独) 				ETR(米)	
一括撤去 (炉内構造物を含む 原子炉容器等)	<ul style="list-style-type: none"> ・ SHIPPINGポート(米) ・ トロージャン(米) 原子力船； <ul style="list-style-type: none"> ・ オットハーン(独) ・ 「むつ」原子炉室(3150t) 	検討例； <ul style="list-style-type: none"> ・ ロビーサ (フィンランド) 		<ul style="list-style-type: none"> ・ 高温ガス炉AVR (独)(2000t) 検討例； <ul style="list-style-type: none"> ・ CANDU炉(加) (2100t) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ JRR-3本体(生体 遮へいを含む 2000t) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ HFBR原子炉容器 等(小片切断解体と 比較検討中)

下記の出典をもとに作成した。

[出典] 宮坂 靖彦:原子炉施設デコミッションングにおける最近の解体技術動向、デコミッションング技報 第25号、p.39 (2002年3月) 及び最新情報より

表3 米国及びドイツにおける原子炉圧力容器等の一括撤去実績

プラント 炉型/出力(万kWe) ・対象機器		廃棄体の製作、重量t、 (輸送時総重量t) 外寸法(直径×高さ)	廃棄体の処分/ 輸送基準	輸送/ 処分場
米国	SHIPPINGポート PWR/7.2 ・RPV+NST+RI	RPV/NST内コンクリート充填、 コンクリート遮蔽、817t、 (5.4mφ×12.3m)	クラスC/ B型緩和条件	特殊車輛・バージ/ DOEリッチランド
	ヤンキロー PWR/18.5 ・RPV	RPV内コンクリート充填銅製廃棄容器、 340t,(365t) (4mφ×8.5m)	クラスA/ LSA A型	特殊車輛・列車・バージ/ バーンウエル
	トロージャン PWR/117.5 ・RPV+RI	RPV内LDCC充填、鉄遮蔽板取付、950t、 (緩衝材含む1020t)、 (4mφ×8.5m)	クラスC/ B型緩和条件	特殊車輛・バージ/ USエコロジ社 ハンフォード
	コネチカットヤンキー PWR/61.5 ・RPV+RI(一部:2/3)	RPV内LDCC充填、 銅製廃棄容器、800t、	クラスC/ LSAⅢ,IP-2型	特殊車輛・バージ/ バーンウエル
	メインヤンキー PWR/92.0 ・RPV+I+RI(一部:2/3)	RPV内LDCC充填、銅製廃棄容器 917t,(1,175t) (5.8mφ×10.7m)	クラスC/ LSAⅢ,IP-2型	特殊車輛・バージ/ バーンウエル
	ビックロックポイント BWR/7.5 ・RPV+I+RI(一部:2/3)	RPV内LDCC充填、 銅製廃棄容器、300t、 (3.8mφ×7.7m)	クラスC/ LSA B型緩和条件	特殊車輛・バージ/ バーンウエル
ドイツ	KGR-1号機、2号機 ・RPV	銅製の環状遮蔽体付き (250t)	未定 (KGRの中間貯蔵施設 に保管中)	未定
	グライフスバルト (KGR:Greifswald) PWR/44 ・RPV+RI(一部:1/3)	銅製の環状遮蔽体付き(130mmt) (360t) (4.3mφ×12m)		
	KGR-5号機(低出力運 転で放射化レベル低い) ・RPV	RPV、217t		
	ラインスベルク PWR/8 ・RPV	不明		

RPV: 原子炉圧力容器、NST: 中性子遮蔽タンク、RI: 炉内構造物、I: 保温材、LDCC: 低密度多孔質コンクリート

下記の出典をもとに作成した。

[出典]宮坂靖彦:原子炉デコミッション技術の現状と10年後の展望、技術予測レポート2023、下巻p229-243、表4 (株)日本能率協会
総合研究所(2013年12月)、及びRalf Borchardt,“Taking apart Greifswald, two ways,” Nuclear Eng.Int., July 2013.

熱的切断技術	水中プラズマアーク	EBWR、ERR、JPDR、KRB-A、Greifswald (KGR)、MZFR、Yankee Row、BR-3 (福島第一、3号のシュラウドの細断)
	接触式アーク切断 (CAMC)	KRB-A (気水分離器、下部グリッド)、MZFR (熱遮へい壁の裁断)、Greifswald (下部炉内版)
	放電加工(EDM)	BR-3、(福島第一、3号のシュラウドの撤去)
	接触式アーク(CAMC)	KRB-A
機械的切断技術	円盤鋸等	Zion, Ranch Seco , BR-3, KGR
	研磨剤入りウォータージェット (AWIJ、AWSJ)	JPDR (遮へい体)、 VAK (炉内シュラウド)、BR-3、(福島第一、2号シュラウドの細断)、Mane Yankee
	ロールカッター	(福島第一、2号シュラウド撤去)

下記の出典をもとに作成した。

[出典]宮坂 靖彦:原子炉施設デコミッションングにおける最近の解体技術動向、デコミッションング技報 第25号、p.40 (2002年3月) 及び最新情報より

表5 原子炉圧力容器の切断技術
EBWR解体プロジェクト評価ランキング(ANL, 1991)

技 術	速 度	開発要求	コスト	炎	評価ランク	実施、計画例*
アーク・ガウンジングと酸素アセチレンガス	高	なし	低	あり	1	
酸素アセチレンガスと酸素プロパンガス*	高	なし	低	あり	2 [1]	KRB-A*, MZFR(胴部) Stade*, Zion(気中、準備中)
プラズマ・アーク	高	なし	中	あり	3 ②	ERR(76mm空気中)
制御爆破	高	なし	中	なし	4	
研磨剤入水ジェット	中	なし	中	なし	5	Rancho Seco(胴部、気中) Wurgassen(胴部、気中)
機械式クラッド除去と酸素アセチレンガス	中	なし	中	あり	6	
機械切断	中	あり [なし]	低	なし	7 [2] ①	BR-3 114mm水中 EBWR(64+2.8mm空気中) MZFR(細断:バンドソー)
アーク・ソー切断	高	あり	高	あり	8 [3]	JPDR(73mm水中)
レーザー切断	中	あり	高	なし	9	
放電加工(EDM)	低	あり [なし]	高 [中]	なし	10 ②	
発熱反応切断	中	あり	-	-	11	
ダイヤモンドワイヤー	低	あり	-	-	12	Rancho Seco(蓋、気中)

(注) []:KRB-A評価、○:BR-3評価

下記の出典をもとに作成した。

[出典]宮坂靖彦:原子炉施設デコミッションングにおける最近の解体技術動向、デコミッションング技報 第25号、p.40(2002年3月)、及び最新情報より

表6 水中での切断技術の比較

切断技術		切断切粉 サイズ	2次廃棄物	長 所	短 所
機 械 的 切 断	グラインダー	0.1～1.0 mm	10～35 (kg/m ²)	あらゆる材質に適用	グラインダーの交換作業
	鋸、粉碎切断	1.0～5.0 mm	10～35 (kg/m ²)	副次生成物の回収	正確な位置決め
	ニブラ	10 mm	96 (kg/m ²)	副次生成物の回収	同一対象物のみの連続切断
	ウォータ・ジェット	1.0mm～500 μm	切粉:8kg 研磨剤:750kg	あらゆる材質に適用、 ヘッド部・小	HEPAフィルタ要
熱 的 切 断	放電加工(EDM)	1.0mm～50 μm	10～40 (kg/m ²)	あらゆる金属に適用、 ヘッド部・小	イオン交換装置 HEPAフィルタ、ドロス回収
				ヘッド部・小	アシストガス、ドロス回収 正確な位置決め
	プラズマ	0.1～3.0 mm	20～40 (kg/m ²)	ヘッド部・小	アシストガス、ドロス回収 正確な位置決め

[出典]宮坂 靖彦:原子炉施設デコミッションングにおける最近の解体技術動向、デコミッションング技報 第25号、
p.40(2002年3月)

表7 グライフスバルト原子力発電所の構造物の推奨切断ツール

	対象機器	推奨切断ツール	バックアップツール
乾式切断 エリア	原子炉圧力容器(RPV)	バンドソー	酸素バナー
	原子炉キャビティ 下部放射化部分 ・円筒状リング	バンドソー	プラズマバナー
	保護管ユニット 下部放射化部分 ・円筒状リング	バンドソー	プラズマバナー
湿式切断 エリア	原子炉キャビティ 上部放射化部分 ・円筒状リング	バンドソー	プラズマバナー
	原子炉キャビティ ・上部プレート ・下部プレート ・チューブ ・円筒状リング	CAMC プラズマ プラズマアングルバナー バンドソー	計画なし CAMC フレットソー/CAMC プラズマバナー
	保護チューブユニット 高放射化部分 ・上部プレート ・下部プレート ・チューブ ・小型のパイプ	CAMC プラズマバナー プラズマアングルバナー CAMA/プラズマアングルバナー	計画なし CAMC フレットソー/CAMC せん断ツール
	炉心バスケット ・円筒状リング ・下部プレート	バンドソー CAMC	プラズマバナー 計画なし
原子炉キャ ビティ内での 解体	RPVノズル 放射化してない部分 ・主冷却管 ・測定ノズル	切削機 バンドソー	計画なし 切削機
	RPV保温材 ・円筒状リング ・下部プレート	アングルグラインダー アングルグラインダー	せん断ツール せん断ツール
	RPV保温材 放射化部分	ワイヤーソー (環状型水タンクと一緒に解体)	計画なし
	環状型水タンク ・円筒状リング ・チューブとパイプ	コンクリート充填後にワイヤーソーで アングルグラインダー	計画なし プラズマバナー/ ハンドバンドソー

[出典] Ralf Borchardt, Jurgen Raasch: Results of the Full Scale Testing of the Remote Dismantling in Greifswald NPP, ICEM03-4777(2003).(Table II、III及びIVより作成)

表8 生体遮へい(コンクリート)の解体工法

対象物	切断工法	実施例
生体遮へい	ダイヤモンドカッター	JPDR(日)
	コアボーリング	JPDR(日), JRR-3(日)
	ワイヤーソー、チェーンソー	KRB-A(独), Fort St.Vrain(米), KKN(独)
	ウォータージェット	JPDR(日)
	ブレーカー	JPDR(日), ERR(米), JRR-3(日)
	制御爆破	JPDR(日), KKN(独), KRB-A(独)

下記の出典をもとに作成した。

[出典]宮坂 靖彦:原子炉施設デコミッションにおける最近の解体技術動向、
デコミッション技報 第25号、p.41(2002年3月)及び最新情報

表9 各種機器の汚染コンクリート除去能力

機器名	除去深さ (mm)	除去率 (cm ³ /h)	操 作
ニードウル・スキャブラ	2	200	手 動
ハンド・スキャブラ	2	1200	手 動
ドライアイス・レーザビーム	2	1600	手 動
床スキャブラ(7個)	3	13800	機 械
壁スキャブラ(3個)	3	13800	機 械
壁スキャブラ(7個)	4	33600	機 械
床シェイバー	1.5	20400	機 械

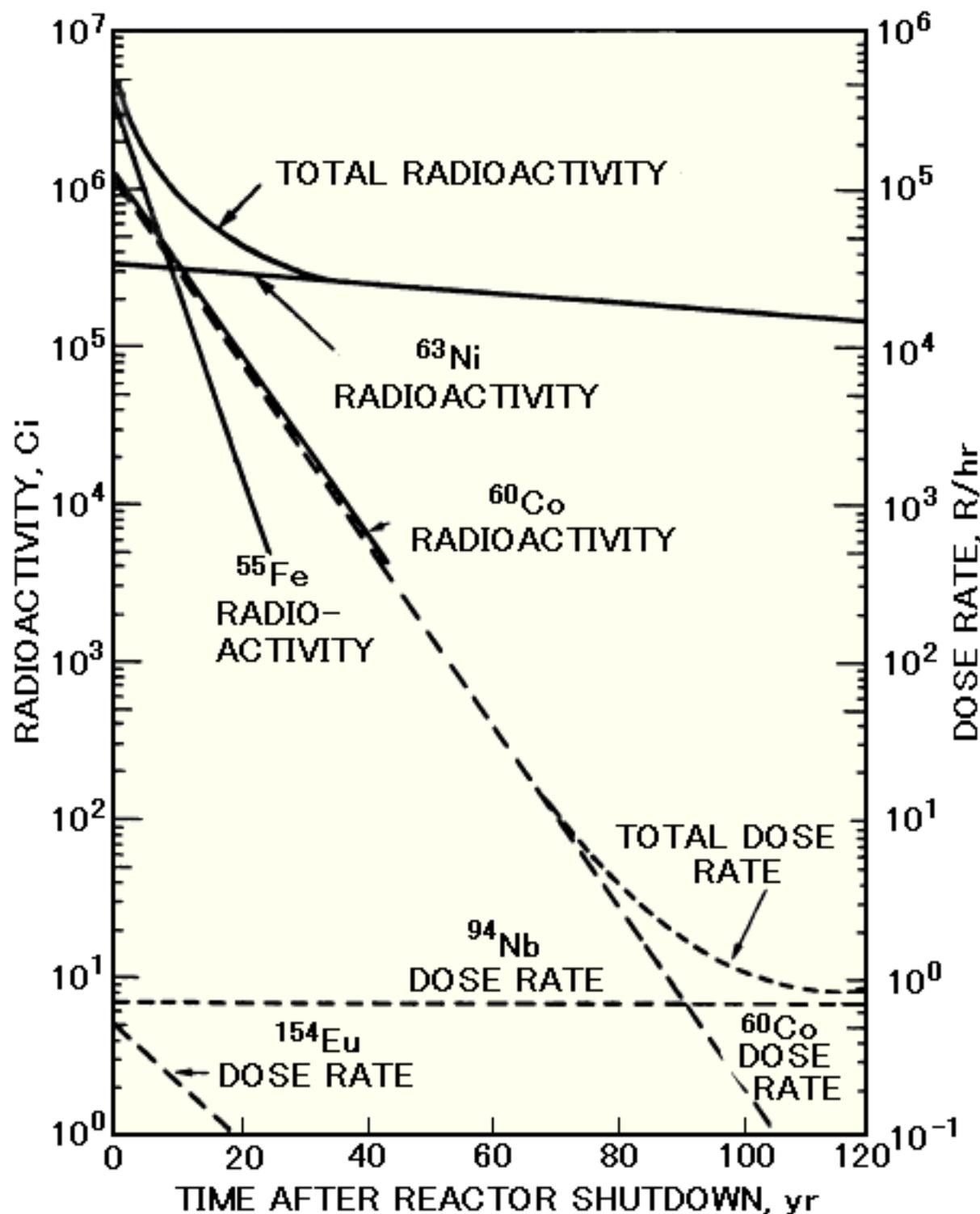
[出典]宮坂 靖彦:原子炉施設デコミッションにおける最近の解体
技術動向、デコミッション技報 第25号、p.41(2002年3月)

表10 原子炉施設の遠隔解体技術

原子炉施設	対象機器	切断冶具	遠隔解体システム
JPDR	炉内構造物	プラズマ・トーチ	マスト型及びマニユプレータ型
	原子炉圧力容器	アーク・ブレイド	マスト型
WAGR	ホットボックス	プラズマ・トーチ	マスト・マニユプレータ等から構成する遠隔解体装置(RDM)
	中性子遮へい	プラズマ・トーチ	
	黒鉛ブロック	つかみ冶具	
	原子炉圧力容器及び断熱材	鉄パウダー入りガス切断	
BR-3	炉内構造物	プラズマ・トーチ	遠隔解体装置
	原子炉圧力容器	円盤鋸	回転テーブル上の切断装置
	中性子遮へい	超高压水ジェット	遠隔解体装置
Greifswald	炉心バスケット	バンド・ソー	遠隔解体装置
Connecticut Yankee	炉内構造物	研磨剤入り超高压水ジェット	遠隔解体装置
Mane Yankee	炉内構造物		
Rancho Seco	炉内構造物	円盤鋸等	
	原子炉圧力容器	研磨剤入り超高压水ジェット	マスト型
Zion1、2	炉内構造物	円盤鋸等	
	原子炉圧力容器	プロパンガス切断	計画中

下記の出典をもとに作成した。

[出典]宮坂 靖彦:原子炉施設デコミッションングにおける最近の解体技術動向、デコミッションング技報 第25号、(2002年3月)、及び最新情報



[出所] NUREG/CR-0672(1980)

図1 炉心シュラウドの放射能インベントリと放射線線量率(BWR)

[出典] 宮坂 靖彦: 原子炉施設デコミッションにおける最近の解体技術動向、デコミッション技報 第25号、p.37(2002年3月)

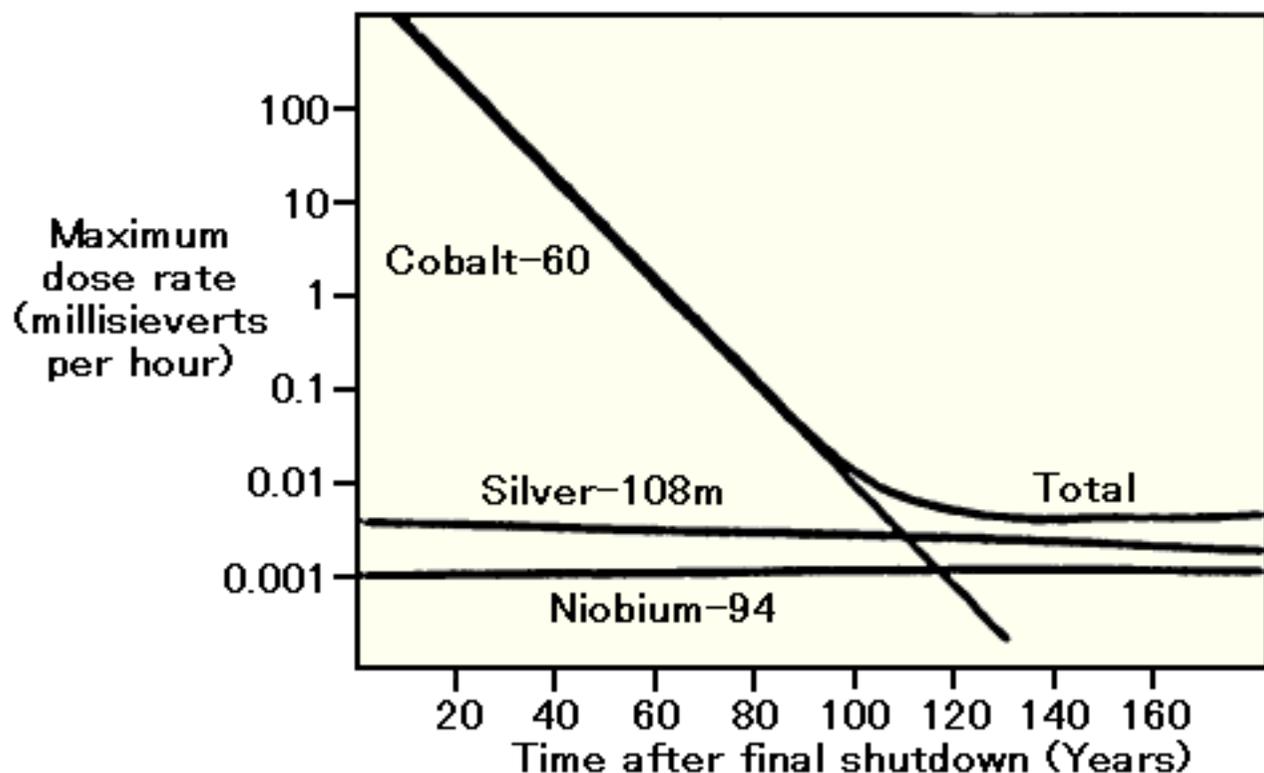


図2 マグノックス型原子炉の炉内放射線量率

[出典]宮坂 靖彦:原子炉施設デコミッションにおける最近の解体技術動向、
デコミッション技報 第25号、p.38(2002年3月)

RPV

輸送兼処分
コンテナ



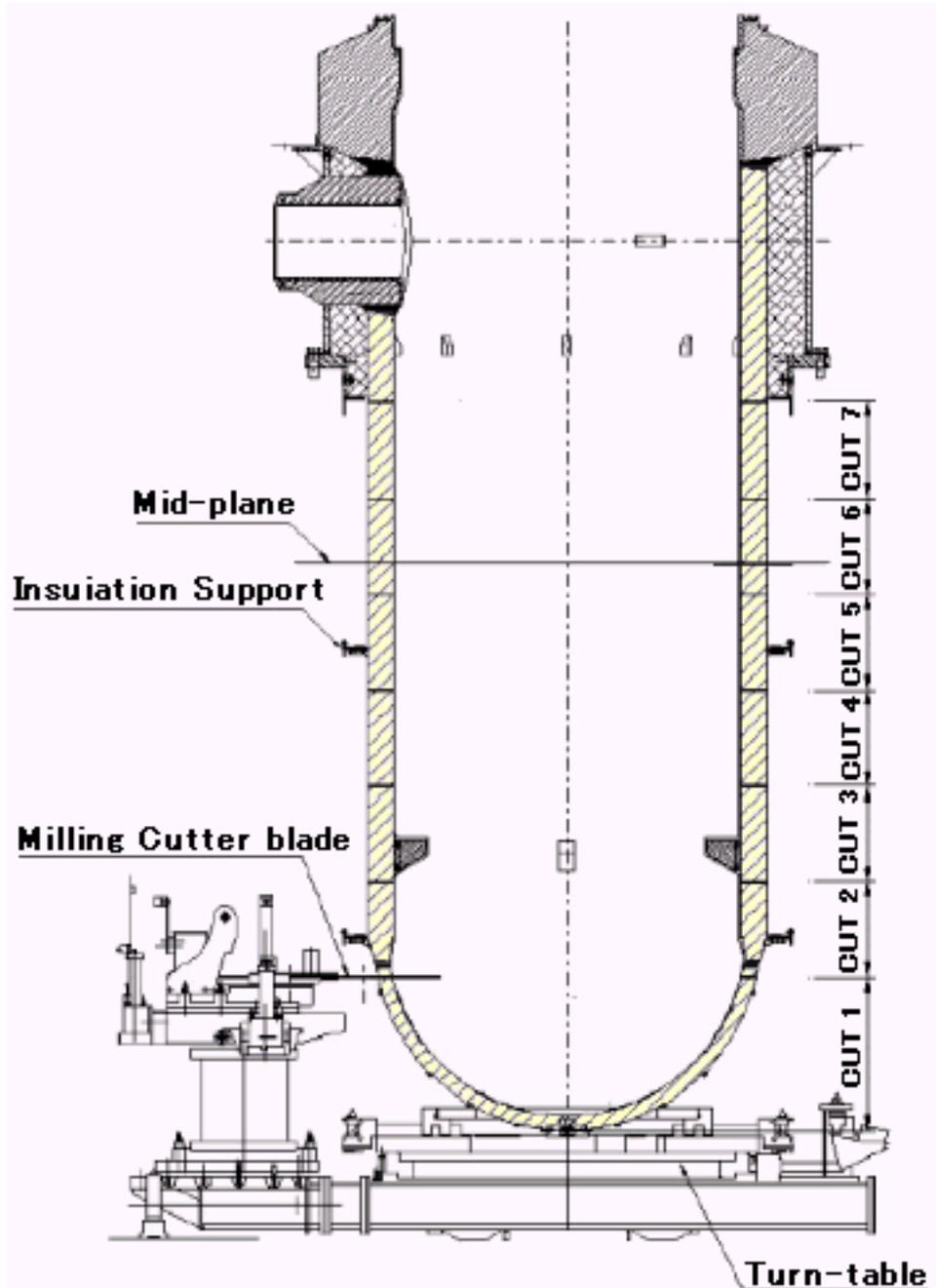
RPV Loading



Crane Lift

図3 サンオフレ炉の原子炉圧力容器一括撤去

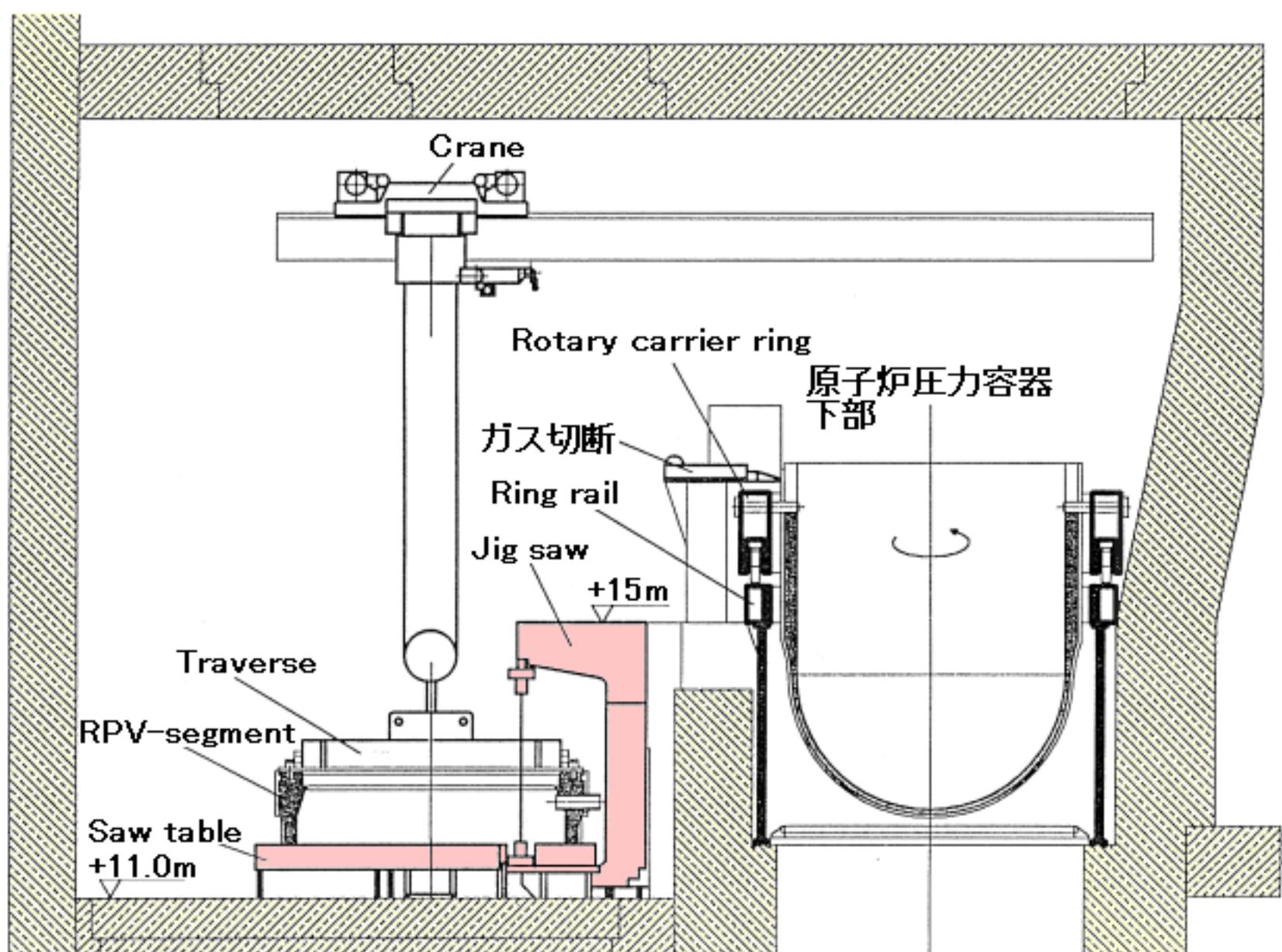
[出典]ANS NEWSLETTER,2003



[出所] J. Dadumont, et al., ICEM '01 (2001), Belgium

図4 BR-3 原子炉圧力容器の回転ソー による切断

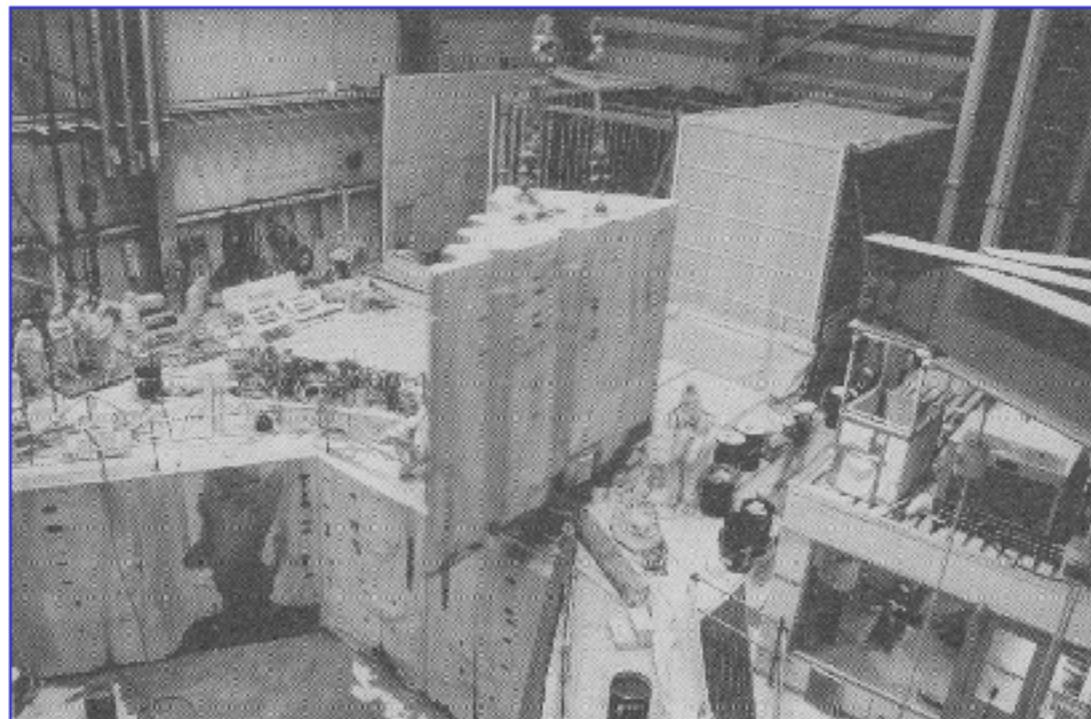
[出典] 宮坂 靖彦: 原子炉施設デコミッションにおける最近の解体
技術動向、デコミッション技報 第25号、p.43 (2002年3月)



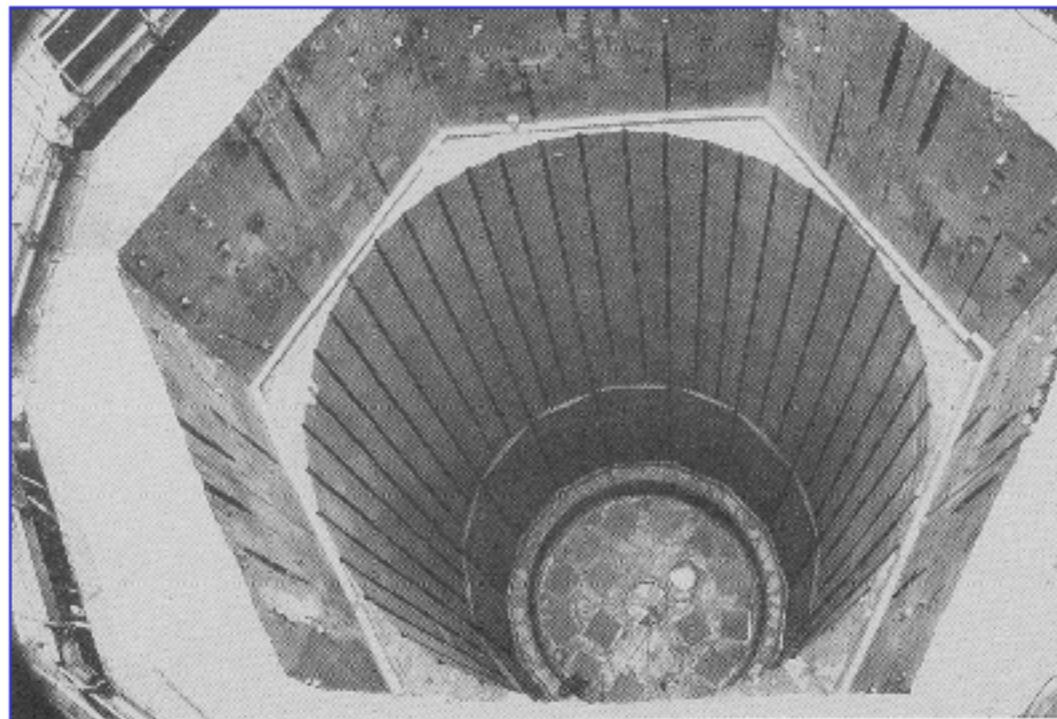
[出所] W. Demant, et al., WM '99(1999)

図5 MZFR原子炉压力容器のガス切断(リング状) およびジグソーによる細断

[出典] 宮坂 靖彦: 原子炉施設デコミッションにおける最近の解体技術動向、
デコミッション技報 第25号、p.44(2002年3月)



解体中

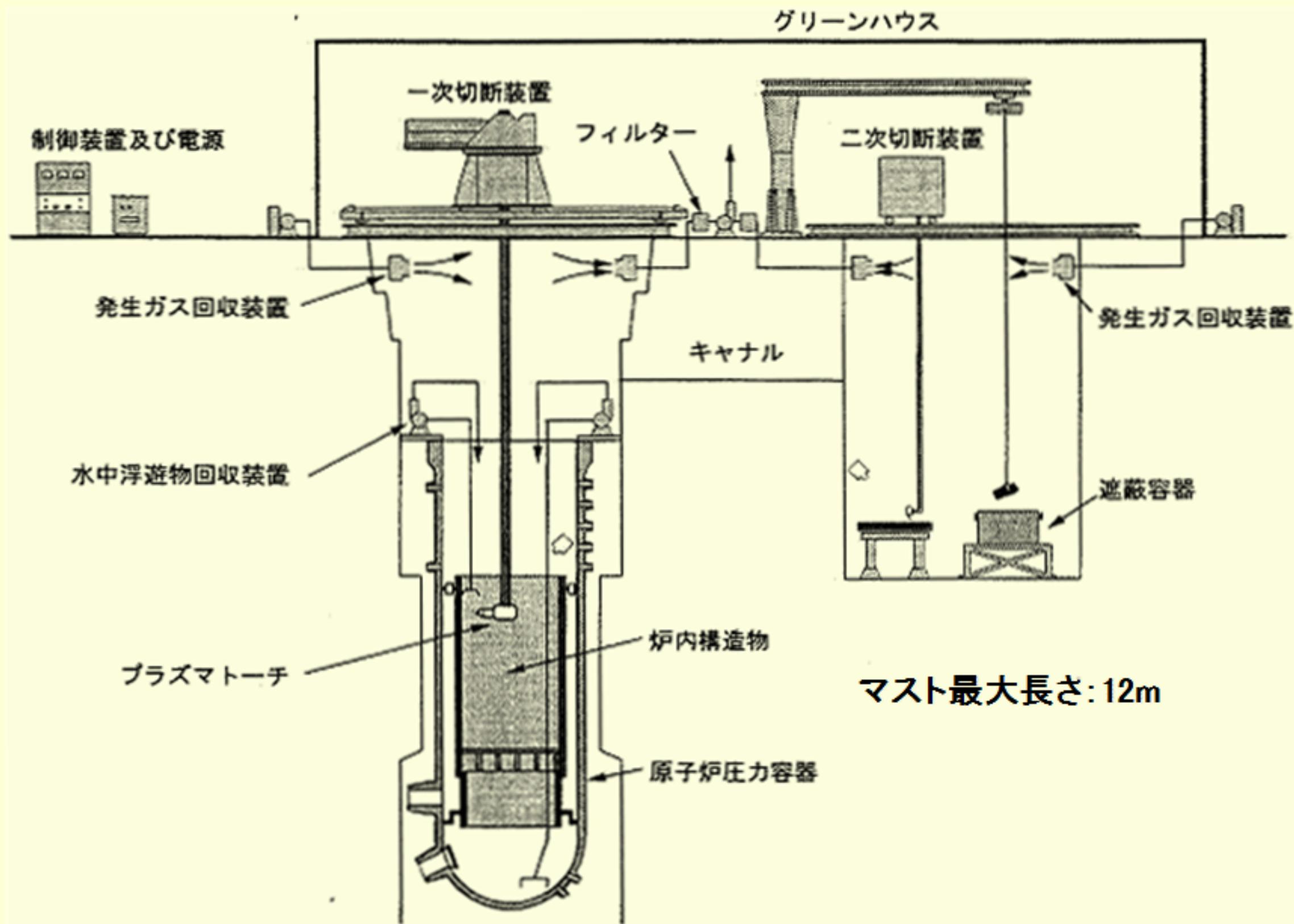


放射化部分撤去後

[出所] Font ST Vsain, Nuclear Eng. Inter., Nov, 1997

図6 ダイヤモンド・ワイヤソーによるコンクリート製原子炉容器の解体

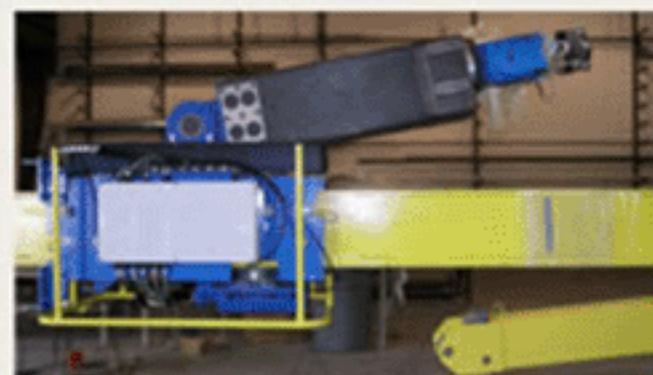
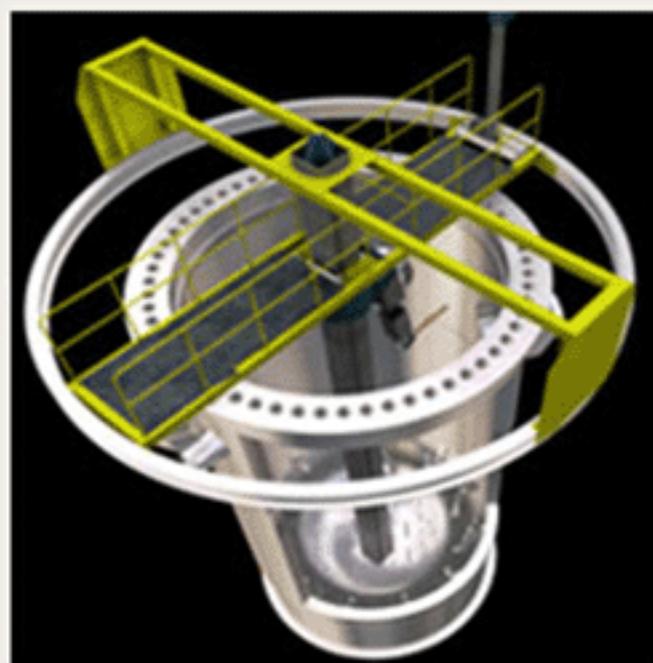
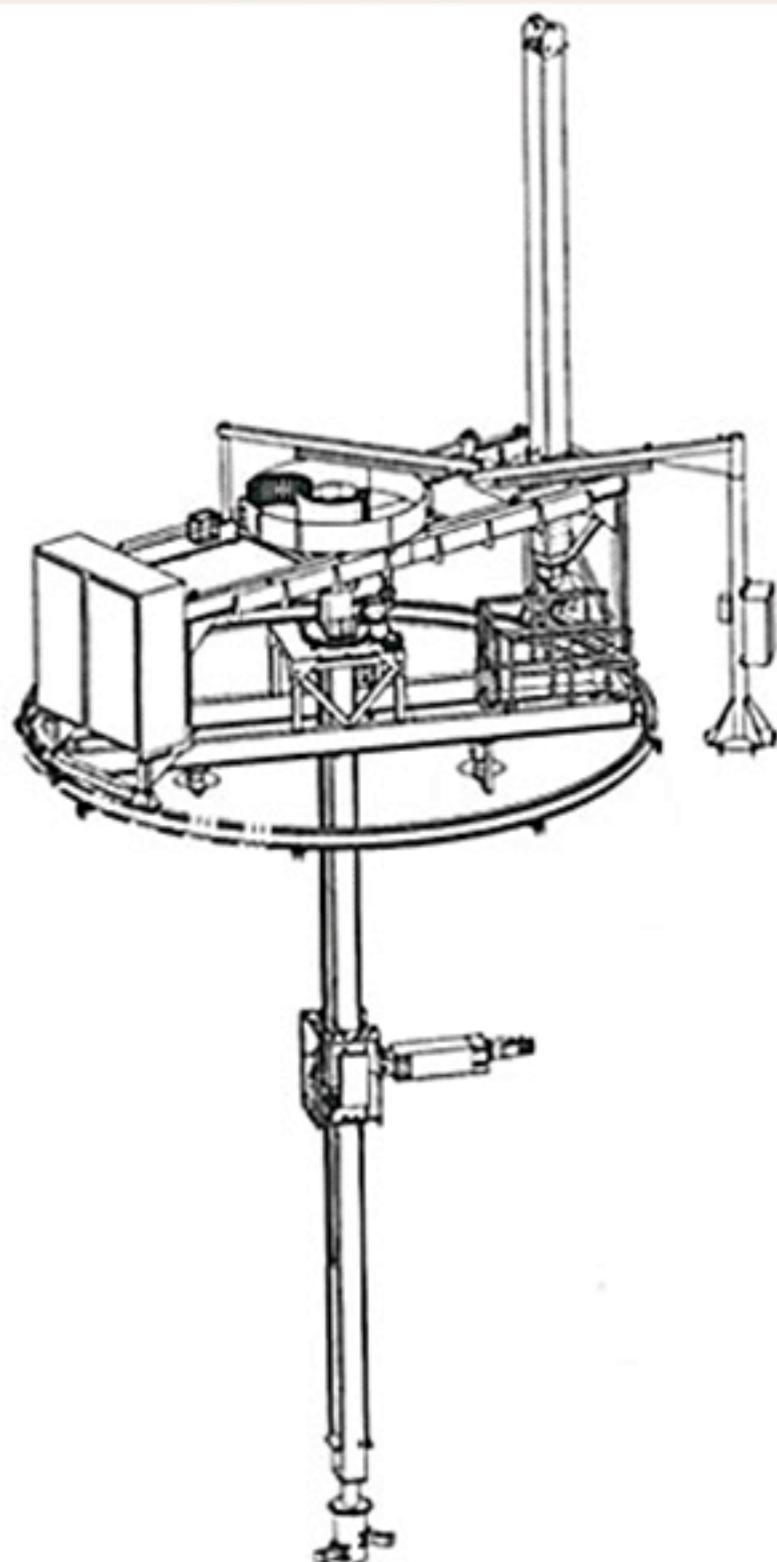
[出典]宮坂 靖彦:原子炉施設デコミッションにおける最近の解体技術動向、
デコミッション技報 第25号、p.41(2002年3月)



炉内構造物、圧力容器の解体撤去実施例

図7 JPDR、マスト型遠隔装置によるプラズマアーク切断システム

[出典] 上家孝三、立花光夫、見喜一郎“JPDR解体実地試験の現状、Part I 設備・機器の解体、原子炉内構造物の解体”
原子力工業、第37巻 第2号(1991) p28-32



Rancho Seco : PWR型、
90万kWe
RPV : 11.4m高さ × 4.34m
内径 × 214mm肉厚

- ・研磨材 : ガネット
- ・切断能力 : 13' (33cm)
- ・圧力 : 55,000psi (約400Mp)

図8 ランチョ・セコ(Rancho Seco)原子炉圧力容器の
超高压水ジェットによる遠隔解体

[出所] Equipment Overview, <http://www.sarobotics.co.uk/g-rancho-seco.html>