

<概要>

ドイツでは、福島第一原子力発電所の事故の影響を受けて脱原子力の機運が高まり、2011年に8基の発電炉が閉鎖され、2013年末時点で稼働している発電炉は9基となった。これまでに閉鎖した発電用原子炉は、9基のBWR、7基のPWR、6基の旧ソ連型のPWR型（VVER）などを含めて合計27基であり、このうち10基が解体を完了している。

ドイツでは即時解体方式の採用を原則に、各プラントの廃止措置計画が進められている。解体技術の開発は、実証炉（グンドレミンゲンKRB-A）を用い、各種の解体ツールの性能確認、また、解体物をリサイクルする方針で解体実地試験が行われた。この経験は、世界最大のデコミッショニング・プロジェクトであるグライフスバルト発電所（44万kWe×5基、VVER-440型）に反映された。その後、脱原子力を目指した改正原子力法が2002年に成立し、電力会社と政府の合意に基づき2003年にシュターデ（PWR：67.2万kWe）、また2005年5月にオブリッヒハイム発電所（PWR：35.7万kWe）が閉鎖された。2011年に閉鎖された8基を除き、多くのサイトで解体が進んでいる。

<更新年月>

2014年03月

<本文>

ドイツではこれまでに27基の発電用原子炉が閉鎖された。閉鎖した発電炉の廃止措置状況を表1に示す。

このうち、ニーダアイヒバッハ炉は1995年に、HDR炉は1998年に解体を完了し、緑地化されている。グンドレミンゲン炉は2005年に解体完了後、建屋を技術センターに転用している。グライフスバルト発電所の5基は2013年に解体を完了した。この他に、シュターデ、ヴェルガッセンなどが解体中であり、高温ガス炉など2基が安全貯蔵中である。

ドイツの原子力政策は、連立政権と4大電力会社との2001年の原子力政策合意により、2000年以降19基の発電炉で2兆6000億kWhの発電を行うこととなった（最長運転期間を32年として全発電炉を閉鎖）。また、2005年7月以降の使用済燃料の再処理を禁止した。これにより、最終処分方式として直接処分が採用され、サイト内で放射性廃棄物の中間貯蔵が義務づけられた。2009年には、代替電源の確保が困難な状況に配慮し、原子力発電所の稼働延長を認める政策が打ち出されたが、その後、2011年に改正原子力法が制定され、2022年を目標にすべての発電炉を廃炉にする予定となった。

原子炉施設の廃止措置は、原子力法第7条による廃止措置手引書（2009年6月26日改定版）で「原子力法第1条の防護目標を前提として、あらゆる廃止措置の最終的な目標は、施設を完全に撤去したあとサイトを解放することである」と定義している。また、「構造物が残っている場合は、放射線学的観点から無制限に、サイトを他用途に向けて解放することである。さらに、まだクリアランスされていない残りの設備を、原子力法による許可を受けた別の用途へ転換することでも、廃止措置を終了させることが可能である」としている。原子炉施設の廃止措置では、即時解体あるいは安全貯蔵のいずれかを選択できるが、原則は即時解体である。廃止措置は連邦環境・自然保護・原子炉安全省（BMU）の規制及び州所管官庁による廃止措置実施者の監督と認可システムの下で実施される。表2に規制関連法規を、図1に廃止措置の全体の流れを示す。解体撤去作業には約10年を要する。

以下にこれまでに停止された原子炉の主な廃止措置概況を記す。

(1) ニーダアイヒバッハ (Niederaichbach) 原子力発電所 (KKN : HWGCR、出力10.6万kWe)

重水減速炭酸ガス冷却型原子炉KKNは、1972年から運転されたが、このタイプの炉の開発が中止され、1974年停止した。原子力発電所の解体技術の開発や解体作業経験の取得を目的として、解体工事は1987年から開始された。炉内構造物、原子炉容器等の放射化機器は1990年から1993年にかけて回転マニピュレータ型遠隔解体装置により撤去された。また、生体遮へい体は制御爆破や電気式油圧掘削機等を用いて解体された。建屋の除染を行った後、1993年10月に管理区域を解除し、建屋を解体した。全ての解体作業は1995年8月に終了し、サイトは1997年に緑地化を達成している。

(2) グンドレミンゲン原子力発電所 (KRB-A : 二重サイクル方式BWR、出力25万kWe)

小型のグンドレミンゲンKRB-Aは、ECデコミッションング・プロジェクトに指定され解体実証試験に供された。1980年運転終了後、フェーズ1として1983年にタービン建屋内機器の解体を開始。1990年からフェーズ2として原子炉建屋内原子炉給水系の解体を行い、炉内構造物の解体

(フェーズ3)を1993年から開始した。フェーズ2では、汚染レベルの高い二次蒸気発生器(直径2m、高さ9.2m)を対象にアイスソーイング(水張り後凍結させ、バンドソー切断器により輪切り解体する方法)など多くの技術開発が行われた。フェーズ3では炉内構造物をプラズマ・アーク、接触式アーク、弓鋸を用いて切断、解体撤去した。

解体金属廃棄物は、タービン建屋内に除染設備を設け、サイトからの無制限搬出を60%、サイト外の処理センターを経て制限付リサイクル(溶融)として33%を実現することにより、最終処分場の比率を7%にまで低減した。2005年末までに解体撤去が完了し、解体廃棄物はモルスレーベン処分場で管理されている。なお、タービン建屋施設は、運転中の原子炉KRB-B、Cの廃棄物処理用として使用される。KRB-Aの概略を図2に示す。

(3) グライフスバルト (ノルト) 発電所 (Greifswald : VVER-440、出力44万kWe)

この発電所は旧ソ連型加圧水炉5基及び建設中の3基で構成され、ドイツ統一後、旧西ドイツの原子力法に基づく安全基準を満たさなかったため、1990年閉鎖された。ドイツ政府は、この世界最大規模の廃止措置プロジェクトを実施するに当たり、連邦政府直轄のEWN (Energiewerke Nord) 社を設立した。廃止措置計画を図3に示す。

EWN社は、プラント作業経験者の雇用を守るとともに、解体コストを低減するために即時解体を選択した。2012年完了を目指して2000年から本格的工事が進められたが、目標より少し遅れて2013年に完了した。解体撤去工法を確立するため、1999年から2003年にかけて未完成の7号機及び8号機の原子炉压力容器及び炉内構造物を用い、解体、梱包、搬送用の装置を使った遠隔試験解体を実施した。また、5号機は、低出力での試験運転後に恒久停止した。原子炉压力容器の放射能レベルは低かったため、細断することなく2003年11月に一括撤去し、中間貯蔵施設 (ISN) に保管した。遠隔解体試験と5号機の原子炉压力容器の一括撤去の経験を基に解体撤去戦略が検討され、一括撤去方式の方が作業者の放射線被ばくが80%低減し、コストも43~50%低減すると評価された。この評価結果に基づき、当初の廃止措置計画は2003年に図4に示すように変更された。1号機から4号機の原子炉压力容器にはいずれも一括撤去方式を適用し、2005年に準備を開始して2007年11月までに完了した(図5参照)。この原子炉压力容器の一括撤去では、放射能レベルが低い下部の炉内構造物と一体にして、原子炉ピット内で原子炉压力容器の放射線レベルの高い炉心領域に筒状遮蔽を取付け、移送用レール上を滑らせて原子炉建屋外まで移動し、ワイヤー昇降機付門型移送装置を用いて大型トレーラに乗せてISNまで移送して保管された。原子炉建屋及びタービン建屋は、造船、風力発電用の主柱などの製造施設に再利用されている。

廃止措置の費用は概算で32億ユーロ、また、廃止措置に伴う廃棄物は約180万トンであり、この内訳を図6に示す。最終放射性廃棄物の処分量は、区分管理、再利用及び中間貯蔵施設での減衰保管等により16,000トンと見積もっている。

(4) シュターデ発電所

この発電所は、加圧水型で1972年から2003年まで運転された。即時解体を選択し、原子炉压力容器の解体には、遠隔操作によるプロパンガス切断で行われ、2015年完了を目標に、現在、解体の最終段階にある。

(5) ヴィルガッセン発電所

この発電所は、BWR型(67万kWe)で、1995年に廃止措置が決定、1997年から施設解体を実施し、2014年に完了する予定である。1994年9月、炉心シュラウドと格子板に亀裂が入っていることが判明したことから、補修して利用を続けることは経済的でないとして1995年5月に閉鎖された。除染の後、2009年1月から原子炉压力容器の円筒部の解体が開始され、2010年3月に解体が終了した。

(前回更新 : 2008年12月)

<関連タイトル>

原子力施設の敷地などの有効利用 (05-02-01-06)

海外主要国における廃止措置の考え方 (05-02-01-10)

海外主要国における発電炉の廃止措置の実績 (05-02-03-01)

ドイツKKN炉の解体 (05-02-03-11)

グライフスバルト（通称ノルト）原子力発電所をめぐる動き (14-05-03-12)

<参考文献>

- (1) 日本電気協会新聞部：原子力ポケットブック2013年版、2013年9月、p.274-297
 - (2) 経済産業省：海外の廃止措置規制制度について
 - (3) H. Steiner, et.al : Experience with the Dismantling of the NPP's KRB Gundremmingen Unit A, and Veruchsatomkraftwerk KAHL (VAK) , IBC UK Co. Limited, July 1998
 - (4) DECOMMISSIONING IN EUROPE:The KRB-A (Gundremmingen) Pilot Dismantling Project,
 - (5) DECOMMISSIONING IN EUROPE : The Greifswald Nuclear Power Plant (KGR) ,
 - (6) H. Steiner and D. Rittscher, : The Greifswald Decommissioning Project-strategy, status, and lessons learned, Nuclear DECON (2001) , p.235-253
 - (7) Jurgen Raasch and Ralf Borchardt, : Remote Dismantling of the WWER Reactors in Greifswald, ICEM 2001 (2001)
 - (8) European Commission : REPORT EUR 17622, A REVIEW OF THE SITUATION OF DECOMMISSIONING OF NUCLEAR INSTALLATIONS IN EUROPE ANNEX2 SUMMARY OF SHUTDOWN NUCLEAR FACILITIES IN GERMANY (pdf, 55-61) , 、 55-61
 - (9) 日本原子力産業協会：世界の原子力発電開発の動向 2013年版（2013年5月発行）
 - (10) “Decommissioning in Germany”p38-40, Nuclear Eng. Inter. (2/2013) .
 - (11) Ralf Borchardt,“Taking apart Greifswald, two ways” Nuclear Eng. Int. July 2013.
 - (12) Andreas Ehlert,“Best Practice in E.ON Decommissioning Projects”,
 - (13) EWN Project overview, “The Greifswald Decommissioning Project”, Energiewerke Nord GmbH June 2011.
-

表1 ドイツの発電炉の廃止措置概況

炉型別区分	プラント名	出力 (Mwe)	運転期間	廃止措置 期間	廃止措置方式	停止理由	備 考
沸騰水型 (BWR)	グンドレミンゲン (KRB-A)	252	1967-1980	完了	即時解体撤去	経済性	軽水炉解体撤去実証プラント、2005年末に完了。 建屋を技術センターに転用。
	リンゲン (KWL Lingen)	252	1968-1979	1985-1988	安全貯蔵-解体撤去	使命達成	管理区域内の配管を切断、液体を排出。換気系は一部 運転維持、密封管理。ステージ1達成。安全貯蔵中。
	* グロスヴェルツハイム (HDR Kahl)	25	1970-1971	1992-1998	即時解体撤去	使命達成	放射能インベントリが少ない(運転時間:200時間)ため 汎用技術で解体、1998年解体完了。
	* カール(VAK Kahl)	16	1961-1985		即時解体撤去	使命達成	2010年解体完了。
	ヴェルガッセン (KWW Wurgassen)	670	1972-1995	1998-2009	即時解体撤去	経済性	1994年コアーシュラウドおよびグリッドプレートにクラック発 見。CORD法による一次冷却系の化学除染。2014解体完 了予定。
加圧水型 (PWR)	ミュルハイム・ケールリッヒ (Mulheim-Karlth)	1302	1987-1988		不明	政策変更	試運転後、訴訟により運転休止。運転認可無効。 2000年10月閉鎖決定。
	シュターデ(Stard)	672	1992-2003		即時解体撤去	政策変更	4段階作業、2014年解体完了予定。
	オブリッヒハイム(Obrigheimu)	357	1969-2005		即時解体撤去	政策変更	3段階作業、2020年解体完了目標。廃止措置コスト:約5億 ユーロ。
加圧水型 (VVER)	* ラインスベルク (KKR Rheinsberg)	80	1966-1990	1992-2012	即時解体撤去	安全性	運転停止の5基+建設途中の3基と小型炉の解体撤去。 サイト内に除染、細断設備を含む中間貯蔵センター建設。
	グライフスバルト1~5号機 (Greifswald)	440	1974-1990	1992-2012	即時解体撤去	安全性	原子炉本体撤去完了、 タービン建屋・原子炉建屋再利用 2013年原子炉解体完了
重水減速冷却加圧水型 (PHWR)	* カールスルーエ (MZFR Karlsruhe)	58	1966-1984	1988-2005	即時解体撤去	使命達成	一次系配管をCORD/D UV法で除染。炉心構造物及び圧 力容器は遠隔装置で解体(2005-2007年)。 建物解体撤去後、2015年末にサイト緑地化予定。
重水減速ガス冷却型 (HWGCR)	* ニーダアイヒバッハ (KKN Niederaichbach)	106	1972-1974	完了	安全貯蔵-解体撤去	開発中止	解体撤去実証プラント、炉内構造物解体に回転式 マニピレータ使用。1995年8月解体完了。サイト緑地化。
高温ガス炉 (HTGR)	* ユーリッヒ(AVR Julich)	15	1969-1988	1986-2016	安全貯蔵-解体撤去	使命達成	2005年安全貯蔵から計画変更。2014年までに原子炉容 器を一括撤去。2017年頃解体完了予定。
	* THTR-300	308	1987-1989		安全貯蔵-解体撤去	開発中止	燃料搬出後、安全貯蔵中(1997年より2019年まで)。
ナトリウム冷却炉 (SCTR/LMFBR)	* カールスルーエ(KNK-II)	21	1972-1991	1993-2003	安全貯蔵-解体撤去	開発中止	1998年までに二次系及び一次系撤去、原子炉容器撤去等 撤去モックアップ試験中。2020年サイト緑地化予定

* 研究開発用実験炉、実証炉または原型炉

下記の出典をもとに作成した

[出典] ・日本電気協会新聞部:原子力ポケットブック2013年版、2013年10月、p.274-297、
・Andreas Ehlert, "Best Practice in E.ON Decommissioning Projects"等

表2 ドイツの原子炉施設廃止措置関連法規

実施責任	事業者(認可取得者)
規制当局	連邦環境・自然保護・原子炉安全省(BMU):規則の作成と州所管官庁の監督 州所管官庁:連邦委託行政に基づく、廃止措置許可の発給と、実施者の活動の監督
解体方式	標準シナリオなし 廃止措置戦略に対する連邦政府の基本的考え方は以下の通り ・完全な解体撤去と緑地回復 ・他用途への建造物の転換 電力業界のシナリオは以下の通り ・即時解体・遅延解体(10~30年の安全貯蔵)
解体に係る許認可の種類(着手時のもの)	- 解体に先立ち、解体撤去の許認可が必要
関連法令	- 原子力廃止促進法(原子力法改正)(第7条3項) - 原子力手続令 - 放射線防護令 - 循環経済・廃棄物法 - 環境影響アセスメント法(2002)
廃止措置実施に対する法的強制力	認可取得者が廃止措置許可や部分解体許可に規定された条項を満足しなかった場合に、規制当局が廃止措置許可や部分解体許可規定を取り消すことができる。 原子力廃止促進法第17条3項
クリアランス	放射線防護令第29条 - 10 μ Sv/yに基づく核種別放射能濃度(無制限基準、条件付き基準)
サイト解放のための手続き	- 専門家(TUV)による記録文書のレビュー、サイトの査察、確認サーベイの実施 サイト解放基準は以下の通り(放射線防護令(2001年8月1日施行)) ・実効線量等量が10 μ Sv/y以下を基準とし、核種ごとに放射能濃度レベルを導出(土地の無条件基準等)
廃止措置ガイダンス	原子力法第7条による廃止措置手引書を発行(2009)
廃止措置中の安全規制と放射線防護規制の考え方	- 建設・運転に対するすべての安全要件が適宜廃止措置にも適用される。 - 各廃止措置フェーズおよび計画された活動に対して安全報告書の提出が義務付けられている。
廃止措置中の規制当局による検査	- 運転中と同様、当局による検査と監督を受ける。 個々の除染および解体作業に対し計画とスケジュールの提出が要求されており、放射線防護に重点を置いた専門家による安全評価を受けた後、実施される。 - 廃止措置活動に対する規制当局の検査の対象は下記 ・作業手順書 ・作業許可手続き ・放射性スクラップのクリアランス手順 ・廃止措置活動の記録
維持管理に関する規制	- 維持管理方法は廃止措置許可申請文書に記載され、当局が承認する。新規装置は、改造と同様の扱いで許可が必要。新たな工法はモックアップ等によってその有効性を実証する必要がある。 - 安全報告書は各フェーズに対して作成される必要がある。維持管理活動は認可条件の1つとして規定され、規制当局の検査対象となる。

下記の出典等をもとに作成した

[出典] Bernd Rehs, Ernst Warnecke (BfS), "German Decommissioning Guideline" ICEM03-4721(2003), 原子力法第7条による廃止措置手引書を発行(2009), 日本電気協会新聞部:原子力ポケットブック2013年版、2013年10月、p.274-297等

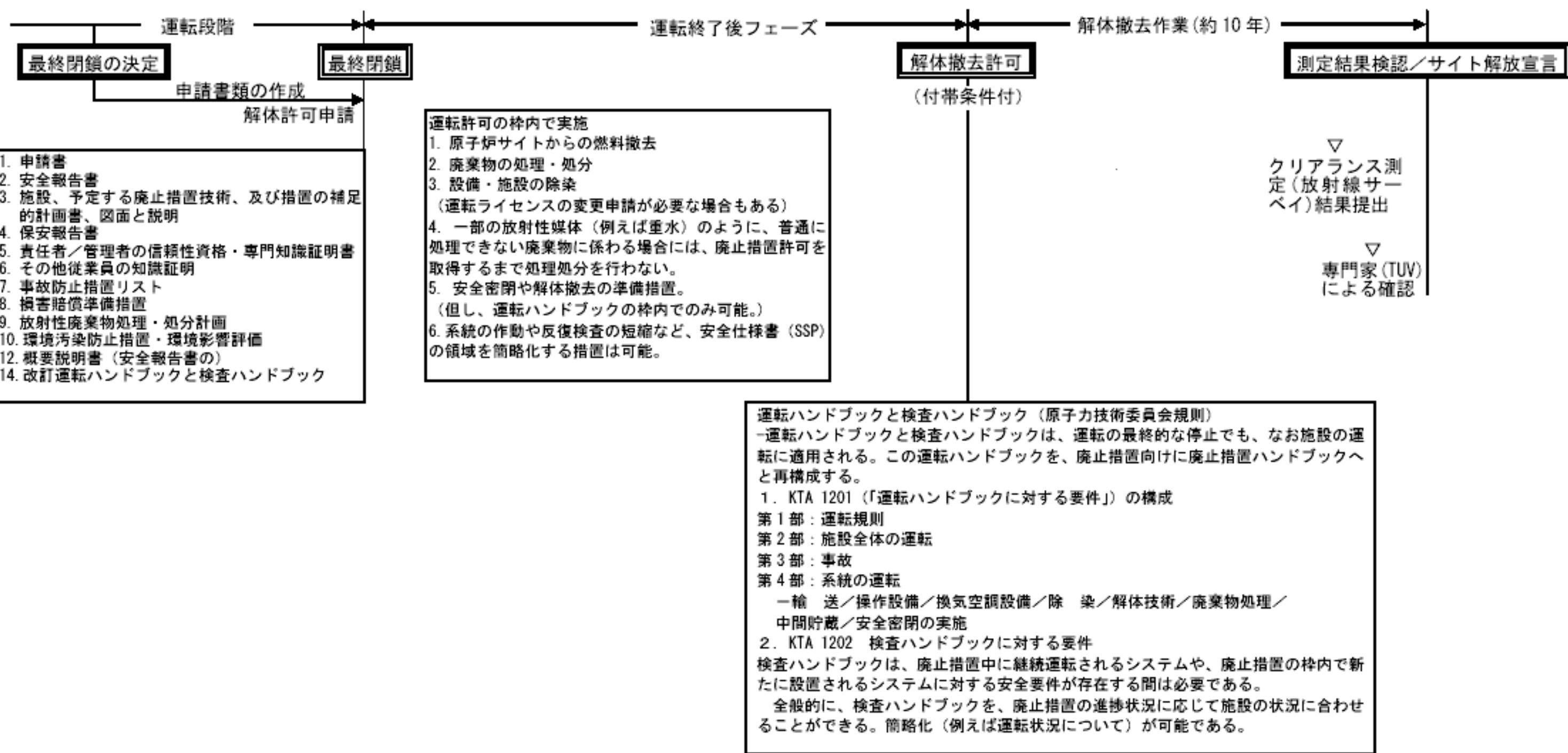
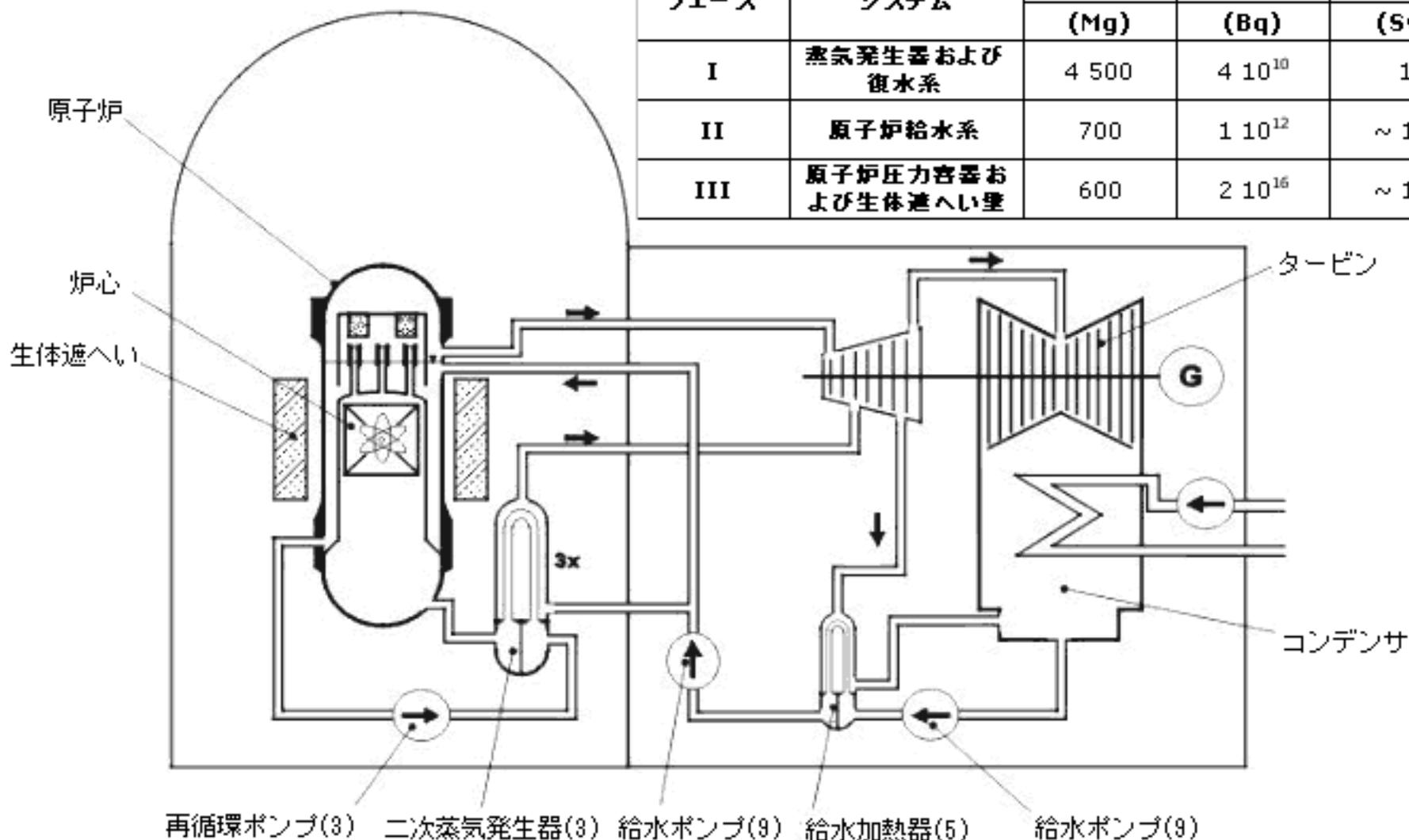


図1 ドイツの原子炉施設廃止措置手続きのフロー

(1) KRB-A主要機器構成

フェーズ	システム	質量	放射能	放射線量
		(Mg)	(Bq)	(Sv)
I	蒸気発生器および復水系	4 500	4×10^{10}	1
II	原子炉給水系	700	1×10^{12}	~ 1.4
III	原子炉圧力容器および生体遮へい壁	600	2×10^{16}	~ 1.5



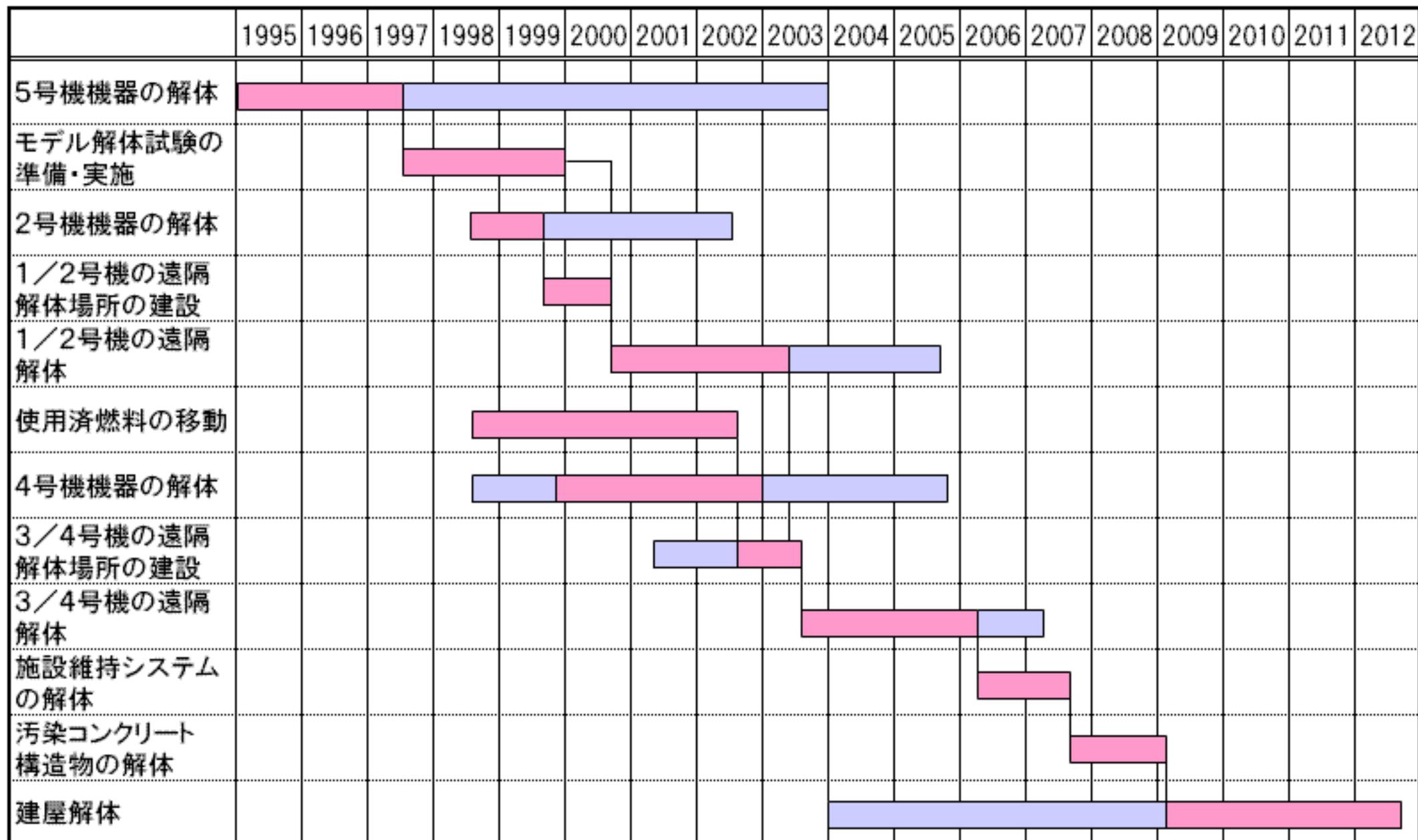
(2) KRB-A解体廃棄物

	汚染物質		放射化物質	
	(%)	(Mg)	(%)	(Mg)
無制限	60	3 120	-	-
溶融	33	1 720	20	120
廃棄物	7	360	80	480

図2 グンドレミンゲンKRB-Aの概略

下記出所をもとに作成

【出所】 DECOMMISSIONING IN EUROPE: The KRB-A (Gundremmingen) Pilot Dismantling Project, http://ec-cnd.net/eudecom/eudecomprj_krba.php?Sid=1b60d0f1fb4e6d203fced0c59e4c15f5



(■ クリティカルパスの意)

1990 年: 運転停止

1993 年: 廃止措置と解体に関する計画概要の公表

1994 年: 発電所の廃止及び施設部分の解体撤去許可申請

1994 年～1999 年: 炉心からの核燃料の取出し及び湿式中間貯蔵施設(ZAB)へ搬出・除染

1994 年～1997 年: 中間貯蔵施設の建設

1995 年: 発電所の廃止及び施設部分の解体撤去許可(6 月30 日)

1995 年～ : 5 号機の管理区域内建屋、タービン建屋内設備・機器の解体撤去作業開始

1996 年: 中間貯蔵施設の使用開始(3 月14 日)

1998 年～ : 管理区域内建屋、タービン建屋内設備・機器の解体撤去作業 (2 号機→4 号機→1 号機→3 号機の順に着手)

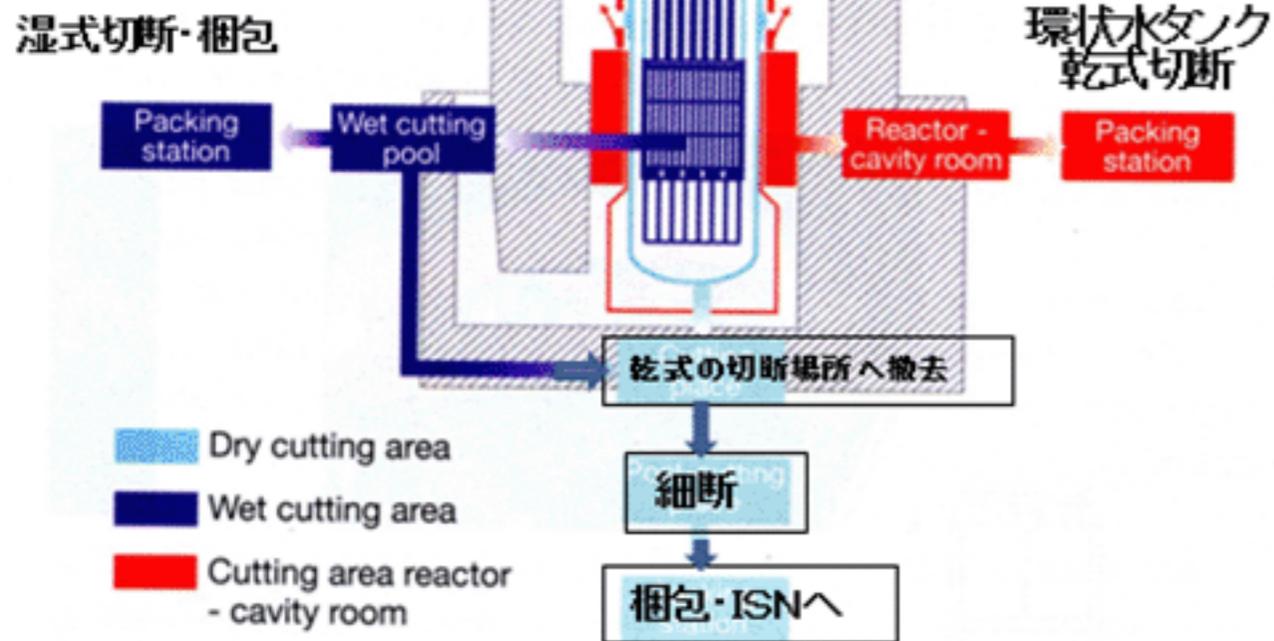
2010 年: 建屋以外の解体終了(予定)

図3 グライフスバルト発電所の廃止措置の計画

下記出典をもとに作成

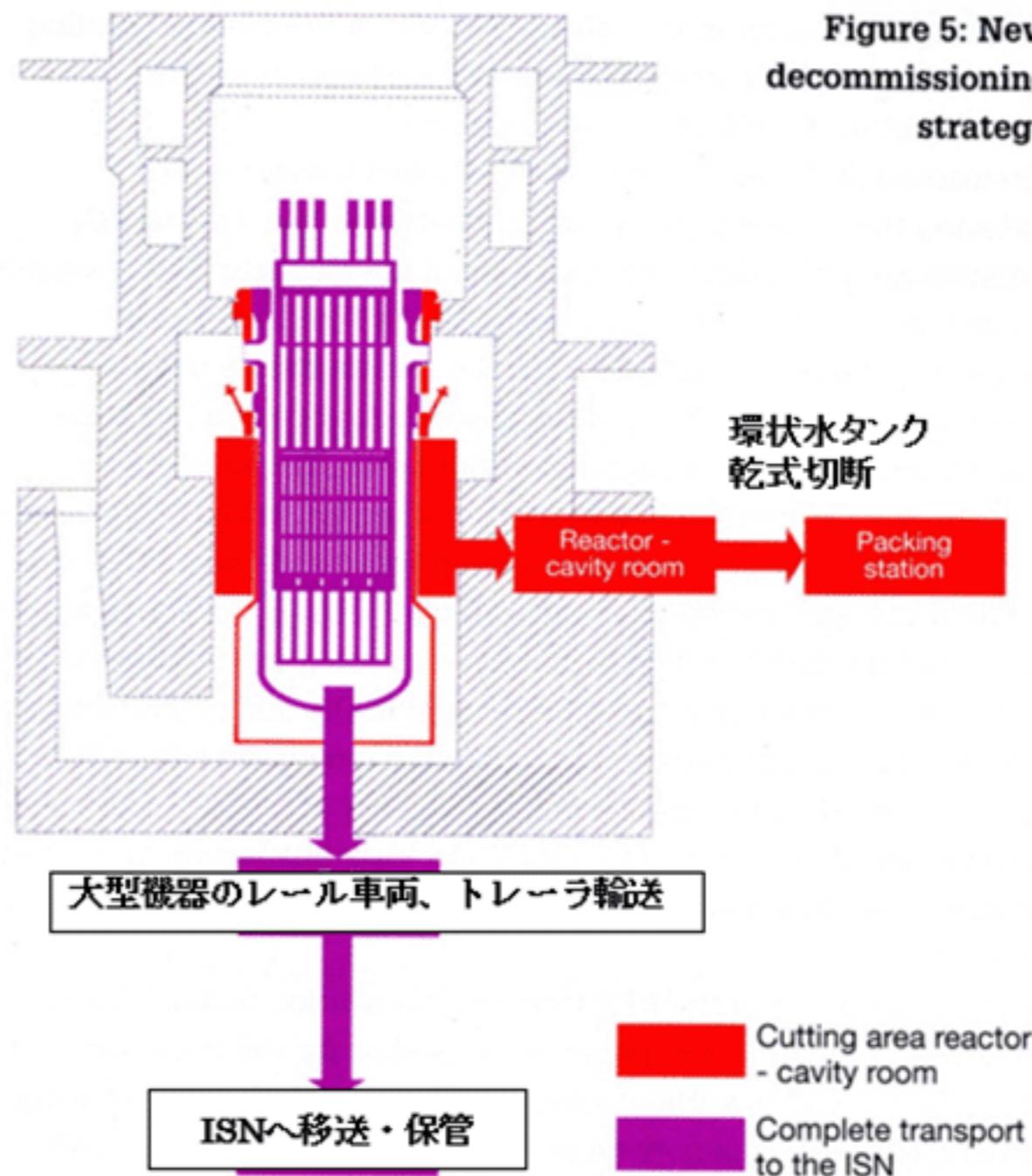
[出典]H. Sterner and D. Rittscher, The Greifswald Decommissioning Project - strategy, status, and lessons learned, p.250, Nuclear DECON 2001

Figure 2: Original cutting strategy



初期計画

Figure 5: New decommissioning strategy



新廃止措置計画“2003年”

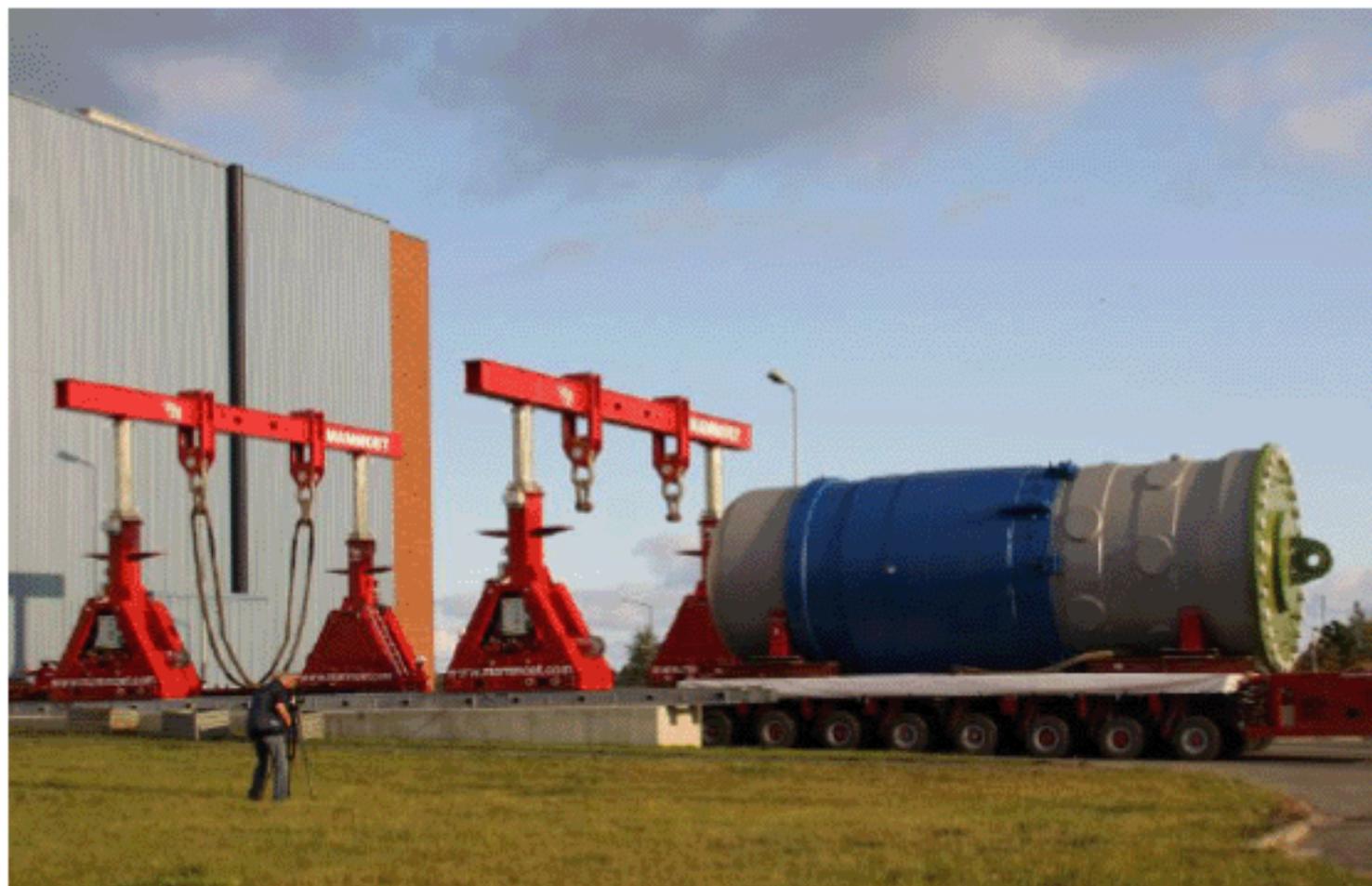
図4 グライフスバルトの初期の切断計画と新デコミ計画との比較

下記の出典をもとに作成した

[出典] Ralf Borchardt, "Taking apart Greifswald, two ways" Nuclear Eng.Int. July 2013. Fig.2及びFig.5



一括撤去の様子



RPVの輸送

図5 グライフスバルトの原子炉圧力容器の一括撤去・輸送

[出典] EWN Project overview, "The Greifswald Decommissioning Project", Energiewerke Nord GmbH June 2011.

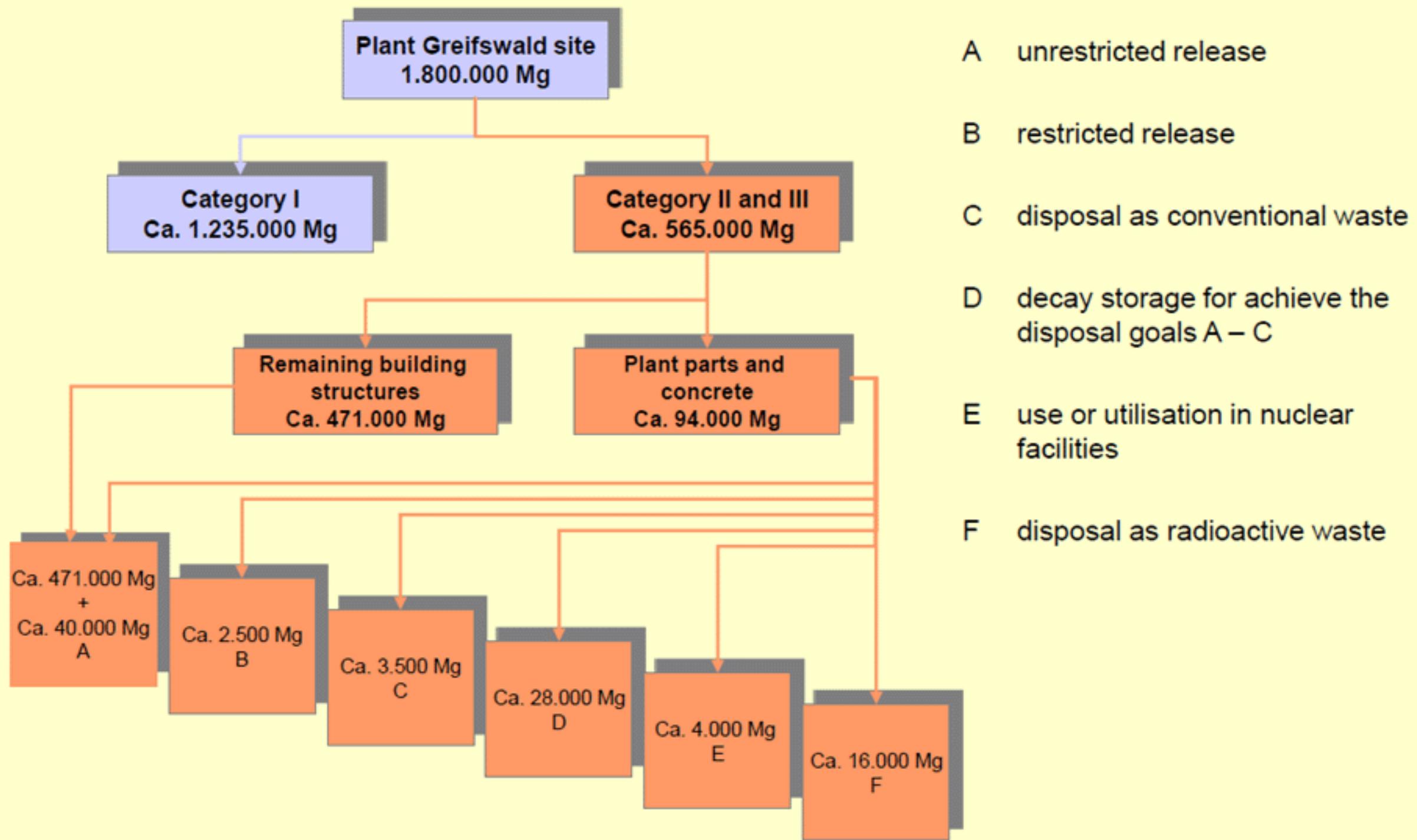


図6 グライフスバルト発電所(5基)の廃止措置による廃棄物の区分と推定量

[出典] EWN Project overview, “The Greifswald Decommissioning Project”, Energiewerke Nord GmbH June 2011.