

<概要>

原子炉压力容器及び炉内構造物など原子炉施設内の鋼構造物は、高度に放射化しているものがある。これらの解体には、高放射線量下で、なおかつ水中での遠隔作業が必要となる。このため、対象鋼構造物の材質や形状、作業環境を考慮して、解体技術開発が進められてきた。解体技術は熱的技術、機械的技術、爆破技術などに分類される。ここでは、炉内構造物、原子炉压力容器等の解体撤去に用いられる代表的な鋼構造物の解体技術について述べる。

<更新年月>

2013年10月

<本文>

原子炉压力容器及び炉内構造物など原子炉施設内の鋼構造物には、原子炉の運転中に、燃料の核分裂反応により発生する中性子の照射を受けて ^{60}Co などの放射性元素が生成される（放射化）。また、運転に伴って冷却材中の腐食生成物等が放射化され、一次系の機器、配管等の表面に付着する。したがって、これらの鋼構造物を解体する場合には作業者の放射線安全を確保するため、遠隔操作による解体技術あるいは特別な解体機器等が必要になる。特に、原子炉本体を構成する压力容器及び炉内構造物は、肉厚であること、あるいは複雑な形状をしていることなどの構造上の特徴を有しているため、解体が困難で煩雑な作業となる。また、使用済燃料を取り除いた後では、これらの構造物が原子炉施設内の残留放射能の約95%を占めており、高い放射線環境下での作業が要求される。このため、これらの構造物については遠隔解体をする必要があり、最も難しい作業となっている。

解体に使用する機器は構造物の材質、形状及び厚み、作業環境や使用条件、解体に伴って発生する副次生成物（気中及び水中浮遊物、溶断くず等）の量などを考慮して選択しなければならない。すなわち、解体時の放射線被ばくを極力抑えるため、機器には切断性能の良いことはもちろん、高い信頼性や狭い作業空間あるいは視認性の悪い作業空間でも使用可能であるといった作業性の良いこと、耐放射線性や耐水性など、厳しい要求が課せられる。このため、対象構造物の材質や寸法、作業環境に応じた種々の技術開発が進められてきた。鋼構造物の解体技術は、高温の熱エネルギーを利用して対象物を溶断する熱的技術、刃物あるいは砥粒を利用した機械的技術、爆薬のエネルギーを利用した爆破技術に分類される。代表的な鋼構造物の解体技術とその特徴及び現状を表1に示す。

最近の米国での大型原子炉の廃止措置事例によると原子炉压力容器は、解体せず一括撤去・処分が主流となっていたが、一括撤去・処分ルート確保が困難であるとの判断から原子炉压力容器を熱的切断技術あるいは機械的技術で細かく解体する例もある。またドイツのグライフスバルト発電所では、5基とも原子炉压力容器を一括撤去し、中間貯蔵施設に保管する方法が採用された。（ATOMICAデータ「原子炉解体技術に関する最近の動向(05-02-02-09)」を参照）

ここでは、旧原研（現日本原子力研究開発機構：JAEA）、諸外国での解体技術開発とJPDR実地解体試験、諸外国の原子炉解体実施例（細かく解体する事例）に基づき、以下に熱的切断技術、機械的切断技術等について述べる。

1. 熱的切断技術

1.1 プラズマアーク切断

この技術の特徴は、切断トーチ（被切断物との間にアークを発生させ、作動ガスをプラズマ化するためのペンシル形及びL形の道具）が小型で、限られた狭い作業スペースでも使用できる点にある。従来から一般産業では鋼構造物の切断に利用されてきたが、この特徴を活かし、切断ト

一チの遠隔操作技術と組み合わせ、高度に放射化して接近が困難な炉内構造物の水中切断作業用に開発された。JPDR炉内構造物の切断に用いた装置及び切断原理を図1に示す。この切断原理は、切断トーチの電極と被切断物の間に作動ガス（窒素、水素、アルゴン等）を流してアーク放電させ、発生するアークとプラズマガスの熱によって金属を溶断するものである。この技術では、水中での切断性能の低下を避けるために最適な供給ガスの種類、混合比、流量、切断電流、切断速度等の選択、また切断トーチの遠隔操作方法などが重要である。

1.2 接触式アーク金属切断（CAMC：Contact Arc Metal Cutting）

この技術は、図2に示すように電極を切断対象物に接触させ、小さな接触面に大電流（約4000A）を流し急膨張させて、切断物を蒸発・イオン化し、アークによりさらに金属を溶断する。溶けた金属は、水ジェットで吹き飛ばされる。この技術は、ドイツのグンドレミンゲン炉の気水分離器や炉心シュラウドの切断に用いられた（図3参照）。

1.3 アークソー切断

この技術は、回転円盤電極（ブレード）と被切断物の間にアークを発生させ、アーク熱により被切断物を溶融し、溶融金属をブレードの回転力で除去して切断を行う。この技術は、図4のようにJPDRの原子炉圧力容器の解体に用いられた。（原子炉圧力容器は、非常に厚く、低合金鋼（最大約420mm：フランジ部）の内面にステンレス鋼（厚さ約10mm）が内張りされている。）

1.4 ガス切断

酸素バーナーを用いる切断技術で、厚肉の原子炉圧力容器等の切断に用いられている。米国のザオン発電所の2基において、ドイツのMZFR炉及びスターデ発電所の経験（図5参照）に基づき原子炉圧力容器の解体にプロパンガス切断を用いて実施する予定（2015年）である。

1.5 アークガウジング・ガス切断

原子炉圧力容器を内側からガスを用いてステンレス鋼を切断すると、酸化反応でクロム酸化物（ Cr_2O_3 ）が生じ、この酸化物の融点は2200℃と高温で、切断が困難になる。そこでアークガウジング・ガス切断技術（G&G法）が開発された。図6に示すようにアーク放電によりステンレス鋼を溶融し、水ジェットにより排除して低合金鋼を露出させる。次に、ガストーチで局所的に空洞を確保し、プロパンガスと酸素の混合ガス炎で母材を加熱溶融により切断する。この技術は、評価は高いがまだ実施例はない。

2. 機械的切断技術

2.1 回転ソー及びバンドソー等の切断

この技術は、切断速度が遅い反面、切断時に発生する2次廃棄物の量が少なく、処理も容易であり、この利点を生かして、高放射化構造物等への適用技術が開発、実用化されている。ベルギーのBR-3炉では、原子炉圧力容器の解体に回転ソー及びバンドソーが用いられた。また、ドイツのMZFR炉では、原子炉圧力容器のリング状にガス切断したものをさらに細断するのにバンドソーを用いている（ATOMICAデータ「原子炉解体技術に関する最近の動向（05-02-02-09）」を参照）。同じくドイツのグンドレミンゲンでは、炉心シュラウド、グリッドプレート等にプラズマ法と併用してハックソーが用いられ、グライフスバルト発電所の1号機及び2号機の炉内構造物の解体にプラズマ法等と併用してバンドソーが用いられている。フランスのショウーA炉では、バンドソー、ディスクソー及びせん断装置を用いて炉内構造物の解体撤去を行う計画が進められている（図7、図8参照）。原子力バックエンド推進センター（RANDEC）では、工具にサイドカッター及びエンドミルを用いて原子炉圧力容器の切断技術を開発している。これらの工具はチタン等を刃先に被覆したものであり、乾式で切断でき、切り粉である2次廃棄物の回収が容易であるという特長を持っている。

2.2 研磨剤入り水ジェット切断（Abrasive Water Jet Cutting）

この技術には、AWIJ（Abrasive Water Injection）法及びAWSJ（Abrasive Water Suspension）法があり、切断ヘッドが小さく遠隔操作性も良く、切断性能に優れている。この技術の原理図を図9に示す。この技術採用には、2次廃棄物として発生する研磨剤を含む廃液処理の考慮が必要である。ドイツでは、AWSJ法による動力試験研究炉VAKの炉内シュラウドを切断した実績がある（図10参照）。AWSJ法は、AWIJ法が水、研磨材及び空気の3相であるのに対し、水と研磨材の2相で、0.5mm直径のノズルから1400バールと超高压で切断するため、切断深さ、切断速度が2倍以上にできる。米国のランチョ・セコの原子炉圧力容器の解体撤去でも採用された。

2.3 ディスクカッタ

生体遮へい体を貫通し圧力容器に接続している配管は、圧力容器と生体遮へい体との隙間がわずかなため、配管の外部から近づくことが困難な状態にある。このような場所にある配管は、配管の内部から遠隔で切断する必要がある。ディスクカッタは、この接近困難な配管の切断を目的に、配管内部に設置する回転ヘッドの小型化の遠隔装着装置の開発などを主眼に開発された。これらによる解体方法は図11に示すとおりである。ディスクカッタの切断の原理は、円盤状のカ

ッタを配管内部において回転させながら対象物に押し付け、対象物を塑性変形させて切り離すことにある。この技術は切り屑を出さずに切断できるため、廃棄物の発生を抑えることができる。

3. 成型爆薬による切断技術

成型爆薬は、接近困難な配管の切断を目的に、配管内部に成型爆薬の遠隔装着装置の開発などを主眼に開発された。成型爆薬による切断の原理は、[図 1 1](#) の右上の図のように爆薬を銅などのケーシングで包み成型したもので、これを所定の位置に設置、爆発させ、爆発によって生じた高速の金属ジェット粒子により瞬時に切断を行うものである。この技術は、爆風圧の問題はあるものの、配管口径の小さなものから大きなものまで、配管サイズに合わせて遠隔でかつ迅速にできるのが特徴である。

4. 各種切断工具の性能評価例

ドイツのグライフスバルト発電所では原子炉の解体を前提に、建設して運転実績のない6号機（PWR型、VVER型ともいう）をモデル解体し、各種切断工具の性能試験を行った。その結果に基づく評価例を[表 2](#) に示す。この成果は、1号機及び2号機の炉内構造物の解体に採用された。（前回更新：2006年4月）

<関連タイトル>

[ロボットによる遠隔解体技術 \(05-02-02-03\)](#)

[原子炉解体技術に関する最近の動向 \(05-02-02-09\)](#)

[米国における発電炉廃炉計画 \(05-02-03-06\)](#)

[英国WAGRの解体 \(05-02-03-10\)](#)

[ドイツKKN炉の解体 \(05-02-03-11\)](#)

[東海発電所（GCR）の廃止措置計画 \(05-02-03-14\)](#)

[JPDRの解体 \(05-02-04-09\)](#)

[JPDRの解体（1992年度以降） \(05-02-04-10\)](#)

<参考文献>

(1) 横田光男・今野孝昭：「原子炉解体技術開発の現状-3 解体工法・解体機器」、原子力工業、32巻、第7号（1986）、p.71-79

(2) 日本原子力研究所：「原子解体技術開発とJPDR解体実地試験」パンフレット（1989年3月）

(3) （財）原子力安全研究協会：「原子力発電所の廃止措置のあらまし」（1989年8月）

(4) 火力原子力発電技術協会：「原子力発電所の廃止措置」、火力原子力発電、Vol.41、No.1（1990）、p.85-103

(5) 横田光男：「JPDRの解体技術」、エネルギーレビュー（1987.6）、p.7-11

(6) 日本原子力研究所動力試験炉部（編）：JPDR解体実地試験の現状、原子力工業、第37巻、第2号（1991）、p.14-58

(7) 宮坂靖彦、他：JPDR解体実地試験の概要と成果、原子力学会誌、Vol.38、No.7（1996）、p.553-576

(8) （財）原子力工学試験センター：「実用発電用原子炉廃炉設備確証試験」パンフレット、1990年度

(9) S. Yanagihara, Y. Seiki and H. Nakamura : Dismantling Techniques for Reactor Steel Structures, Nuclear Technology, Vol.86（1989）, p.148-158

(10) S. Yanagihara, Y. Seiki and H. Namura : Dismantling Techniques for Reactor Steel Piping Nuclear Technology. Vol.86（1989）, p.159-167

(11) 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（2002年3月）、p.36-51

(12) 千野耕一、他、原子炉廃止措置技術の開発状況、日立製作所の技術開発、デコミッショニング技報、第5号（1992年）、p.2-7

(13) 渡辺正秋、他、原子炉圧力容器遠隔切断技術開発、デコミッショニング技報、第23号（2001年3月）、p.28-40

(14) Ralf Borchardt, Jurgen Raasch, Results of the Full Scale Testing of the Remote Dismantling in Greifswald NPP, ICEM03 4777, (Sep. 2003) .

(15) Andreas Ehlert, "Best Practice in E.ON Decommissioning Projects",

<http://www.iaea.org/>.

(16) Holger Spann "Reactor Vessel and Reactor Vessel Internals Segmentation at Zion Nuclear Power Station" KONTEC 2013.

(17) Joseph Boucau, etc. "Chooz A, First Pressurized Water Reactor to be Dismantled in France ? 13445", WM2013 (2013).

表1 鋼構造物の代表的な切断技術

分類		特徴等	適用例
熱的 切断技術	プラズマアーク	炉内構造物などの狭隘部の切断に適用できるが、遠隔装置が必要。	・JPDR炉内構造物
	アークソー	厚肉の金属に適用、装置が大型化する。	・JPDR原子炉容器
	放電加工(EDM)		・BR-3炉内構造物
	接触式アーク(CAMC)	厚肉の炉内構造物に適用。	・KRB-A炉内構造物 ・KGR炉内構造物
	酸素バーナー	厚肉の原子炉圧力容器等に適用。	・MZFR原子炉圧力容器 ・Stade原子炉圧力容器 ・Zion1, 2原子炉圧力容器(計画中)
	アークガウジング・ガス	厚肉でステンレス内張り原子炉圧力容器切断用に開発。	
	レーザー	熱的切断技術の中では、二次廃棄物の発生量が比較的少ない。	
機械的 切断技術	デスク・カッター	構造が簡単、切り屑が少ない。	・JPDRの圧力容器接続配管
	ギロチンソー	在来技術	
	バンドソー	在来技術、単純形状で厚肉かつ大型物に適用。	・MZFR原子炉圧力容器の裁断
	回転ソー	二次廃棄物の発生量が比較的少ない。	・BR-3原子炉圧力容器のリング状切断 ・Zion炉内構造物
	ハックソー	二次廃棄物の発生量が比較的少ない。	・KRB-A炉内構造物 ・KGR炉内構造物
	研磨剤入り水ジェット	切断能力に優れている。二次廃棄物の発生量が多い。	・VAK炉内構造物(WASJ法) ・コネチカットヤンキー炉の炉内構造物 ・ランチョセコ炉の原子炉圧力容器
爆破技術	成型爆薬	狭隘部に適用。爆破に関する安全対策必要。	・JPDRの圧力容器接続配管

下記の出典をもとに作成した

[出典]

(1)日本原子力研究所動力試験炉部(編):JPDR解体実地試験の現状、原子力工業、第37巻、第2号(1991)、p.14-58

(2)宮坂靖彦、他:JPDR解体実地試験の概要と成果、原子力学会誌、Vol.38、No.7(1996)、p.553-576

(3)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)、p.36-51

(4)Ralf Borchardt, Jurgen Raasch, Results of the Full Scale Testing of the Remote Dismantling in Greifswald NPP, ICEM03 4777, (Sep. 2003)

(5)Andreas Ehlert, "Best Practice in E.ON Decommissioning Projects" <http://www.iaea.org/>.

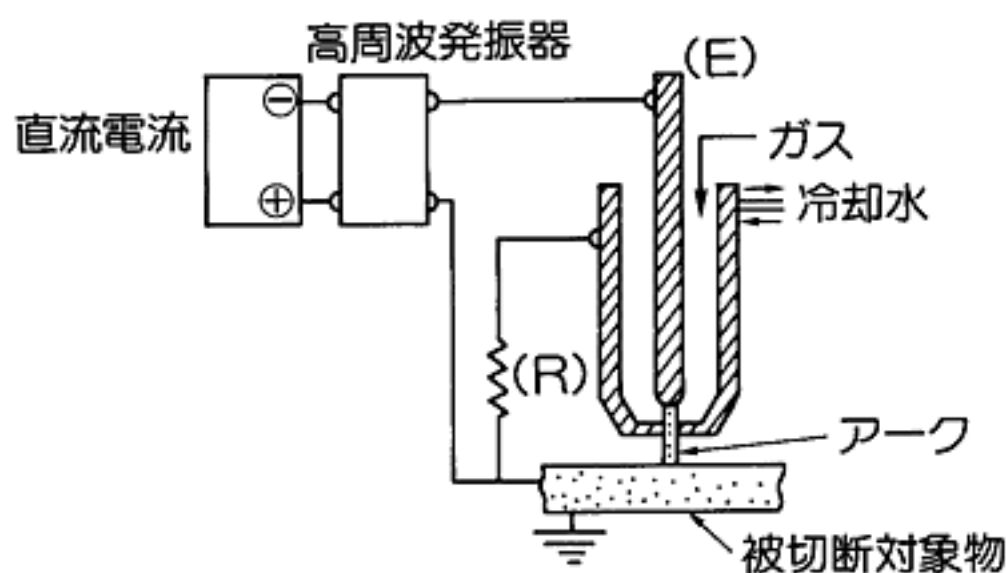
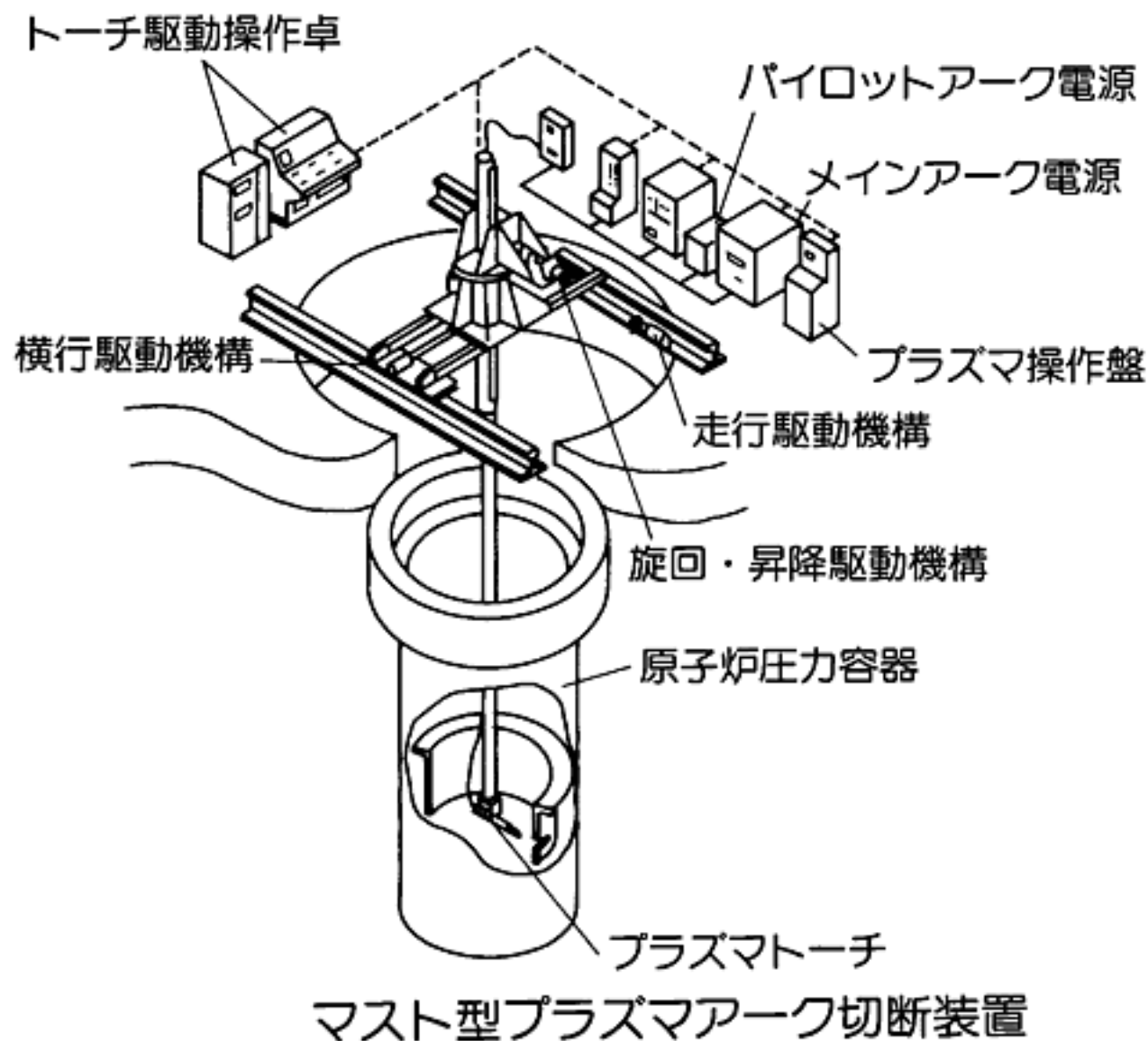
(6)Holger Spann "Reactor Vessel and Reactor Vessel Internals Segmentation at Zion Nuclear Power Station" KONTEC 2013.

表2 各種切断工具の性能試験結果と評価

切断工具	試験結果		利点	欠点
	切断速度 (mm/分)	厚さ (mm)		
バンドソー	5 10 22	149 70 38	汚染管理が容易	単純形状に限定される。
酸素バーナー	15	149	切断速度が速い	汚染拡大
プラズマバーナー	25 45	70 38	切断速度が速い	汚染拡大
酸素コアランス (oxygen core lance)	50	149	穴あけに適している。	汚染拡大
フレットソー (fret-saw)	0.5	20	汚染管理が容易	非常に切断速度能力が低い。
アングルグラインダー (angle grinder)	25	5	非常に安価、手作業に適している。	汚染拡大
ワイヤーソー	5 25	・鋼 ・鋼材を含む コンクリート	鋼とコンクリート切断に適している。	複雑構造物
研磨剤入り水ジェット 切断(WASJ)	10	100	80mm以上の厚さに適用可能。	二次廃棄物が多い。
接触式アーク金属切断 (CAMC)	2 5 8	300 70 38	80mm以上の厚さに適用可能。	汚染拡大
切削機 (milling machine)	2 10	・ステンレス鋼 ・炭素鋼	汚染管理が容易	切断強度過大

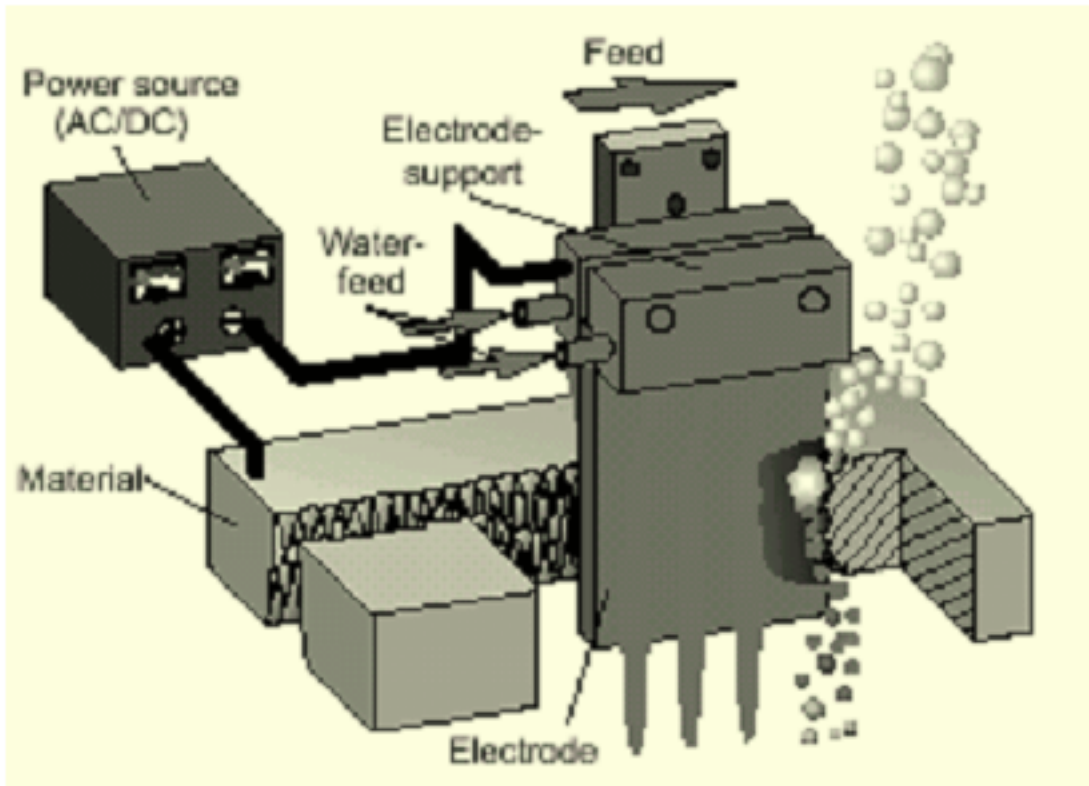
下記の出典をもとに作成

[出典] Ralf Borchardt, Jurgen Raasch, Results of the Full Scale Testing of the Remote Dismantling in Greifswald NPP, ICEM03 4777, (Sep. 2003)



プラズマアークの切断原理

図1 マスト型プラズマアーク切断装置と切断原理



(CAMC:Contact Arc Metal Cutting)

図2 接触式アーク金属切断(CAMC) 技術概念図

[出典](財)原子力技術バックエンド推進センター:
デコミッションング技報、No25.(2002)、p.43

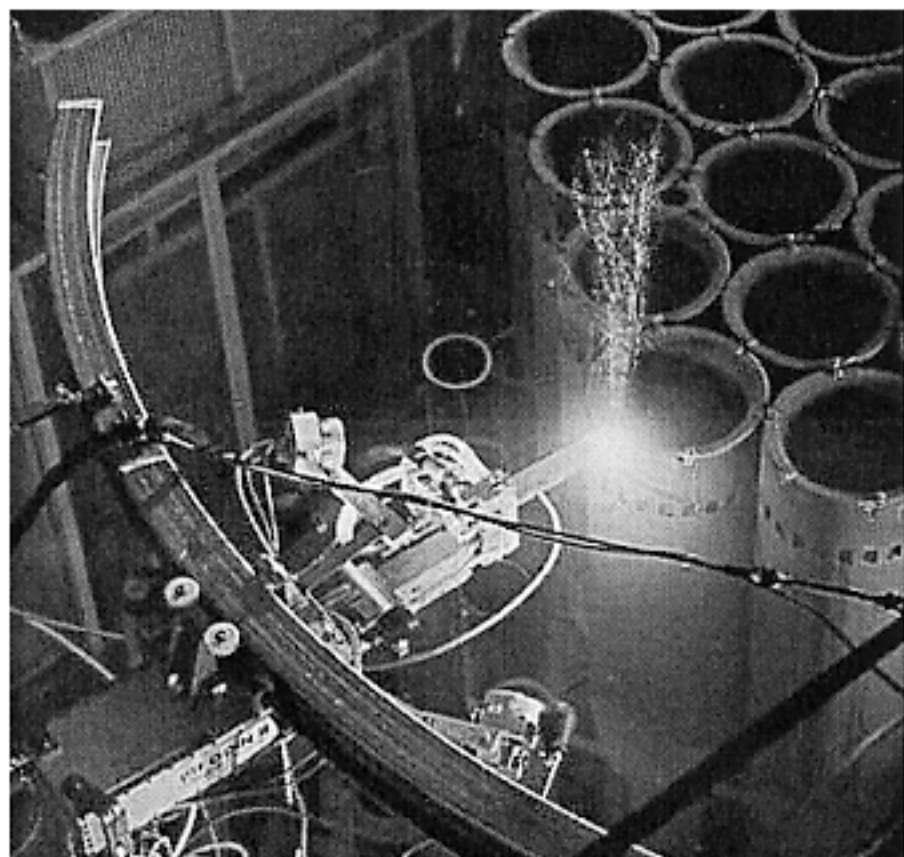


図3 CAMCによる炉内構造物の解体撤去
(KRB-A)

[出典] H.H.Alba, N.Eickelpasch, D. Schmidt, H. Stener, Innovative Underwater cutting Procedures for the Dismantling of Two German Nuclear Power Plants, WM' 99, (1999. 04)

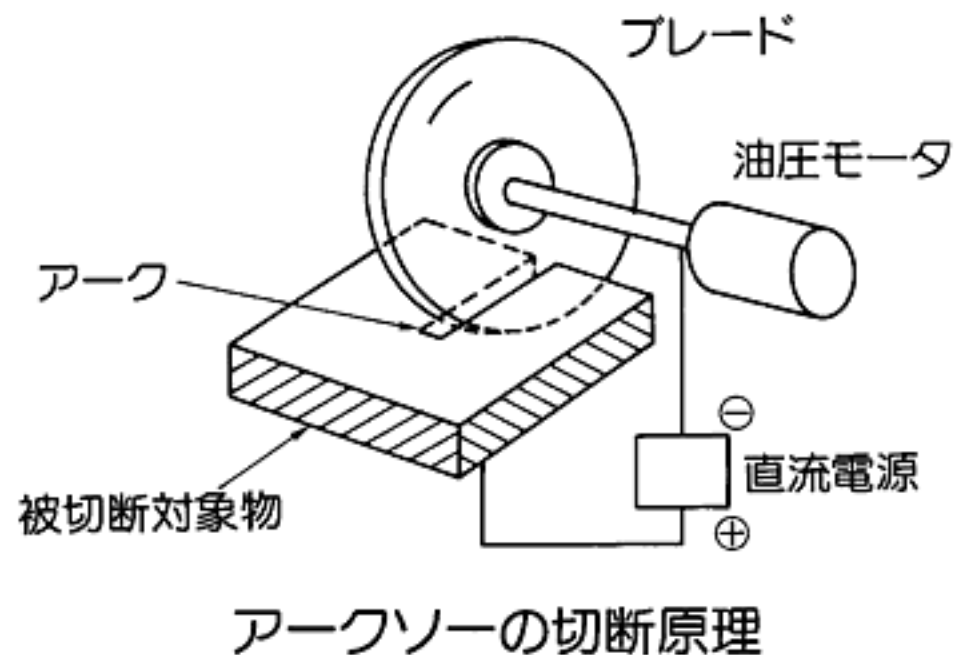
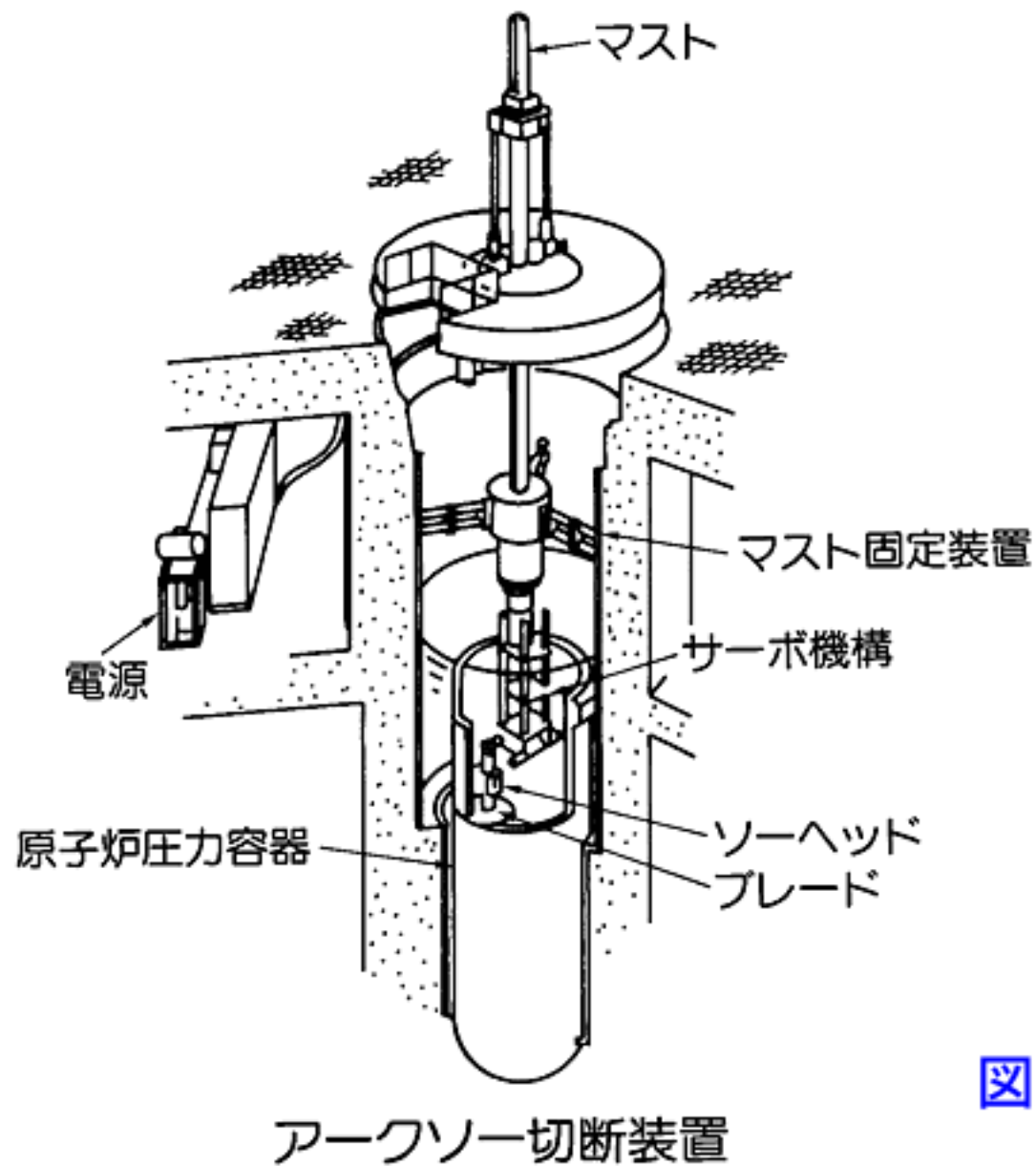


図4 アークソー切断装置と切断原理



原子炉圧力容器切断パターン



Remote oxy-fuel cutting (direction from outside to inwards)

図5 ドイツのシュターデでのRPVガス切断の様子

【出所】 Andreas Ehlert, "Best Practice in E.ON Decommissioning Projects", <http://www.iaea.org/>より

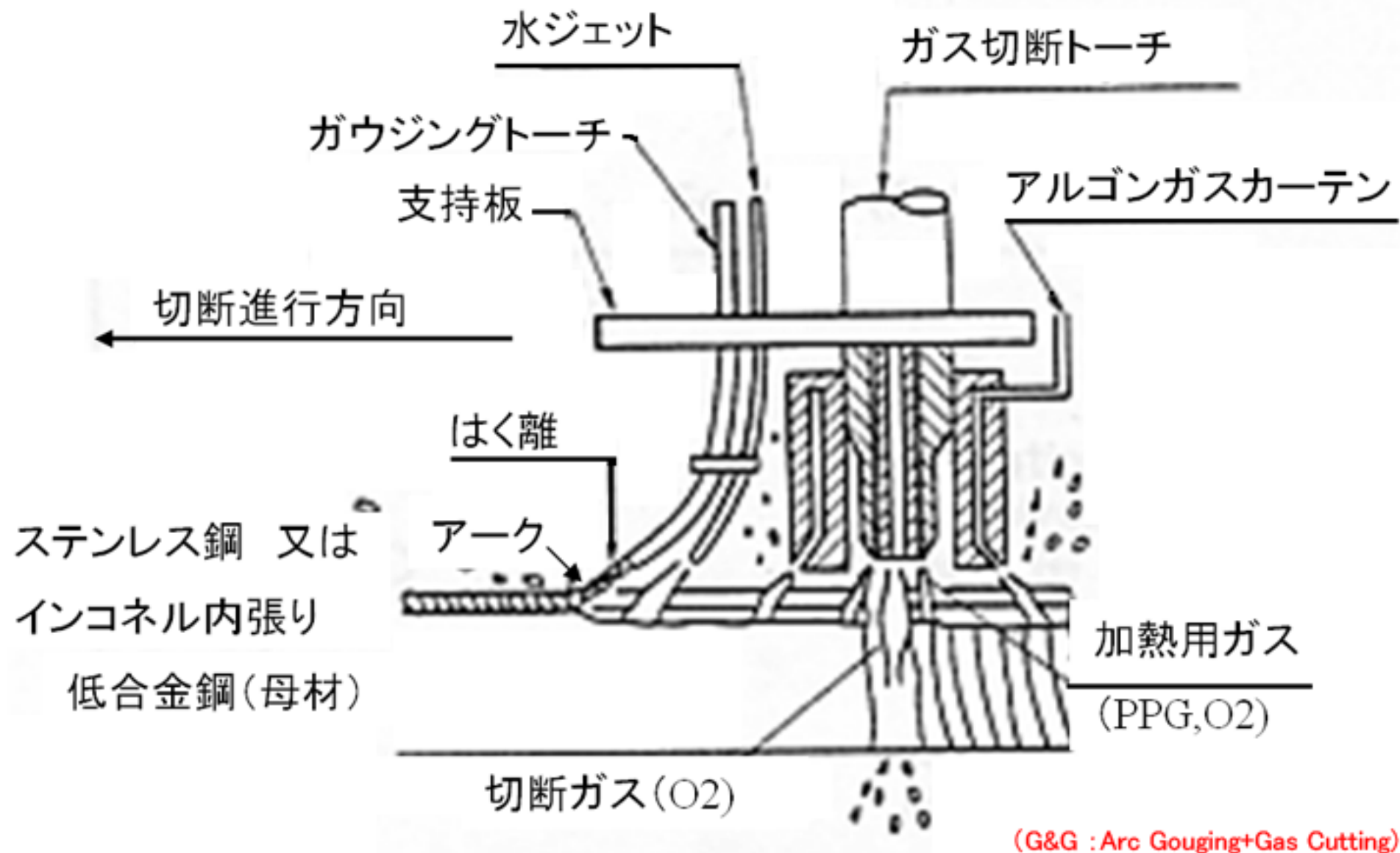


図6 アークガウジング・ガス切断技術(G&G法)

[出典] 千野耕一、他：原子炉廃止措置技術の開発状況、日立製作所の技術開発、デコミッショニング技報、第5号(1992年)、p.2-7

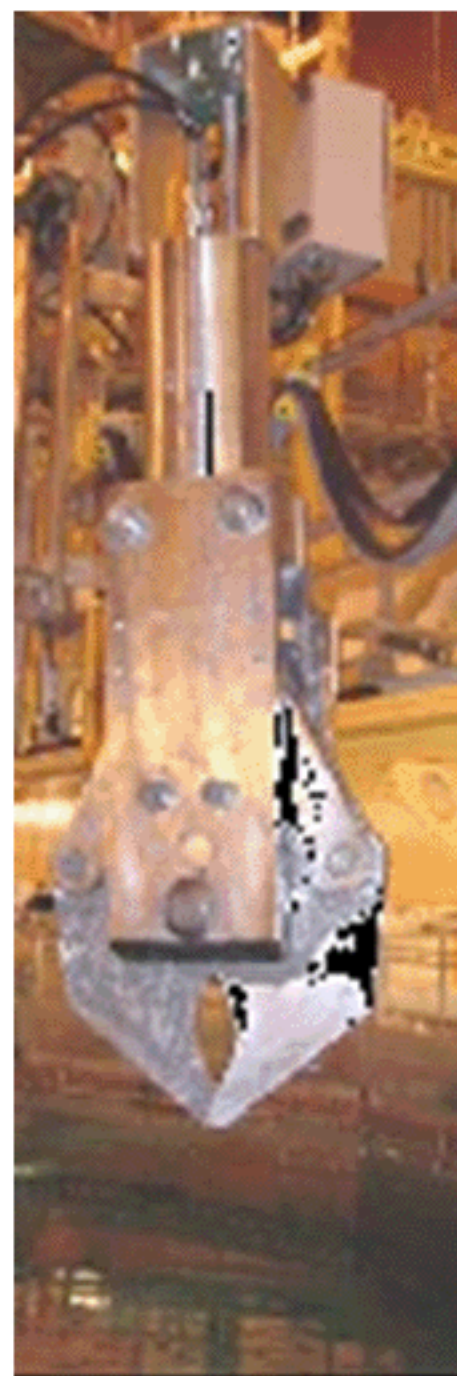
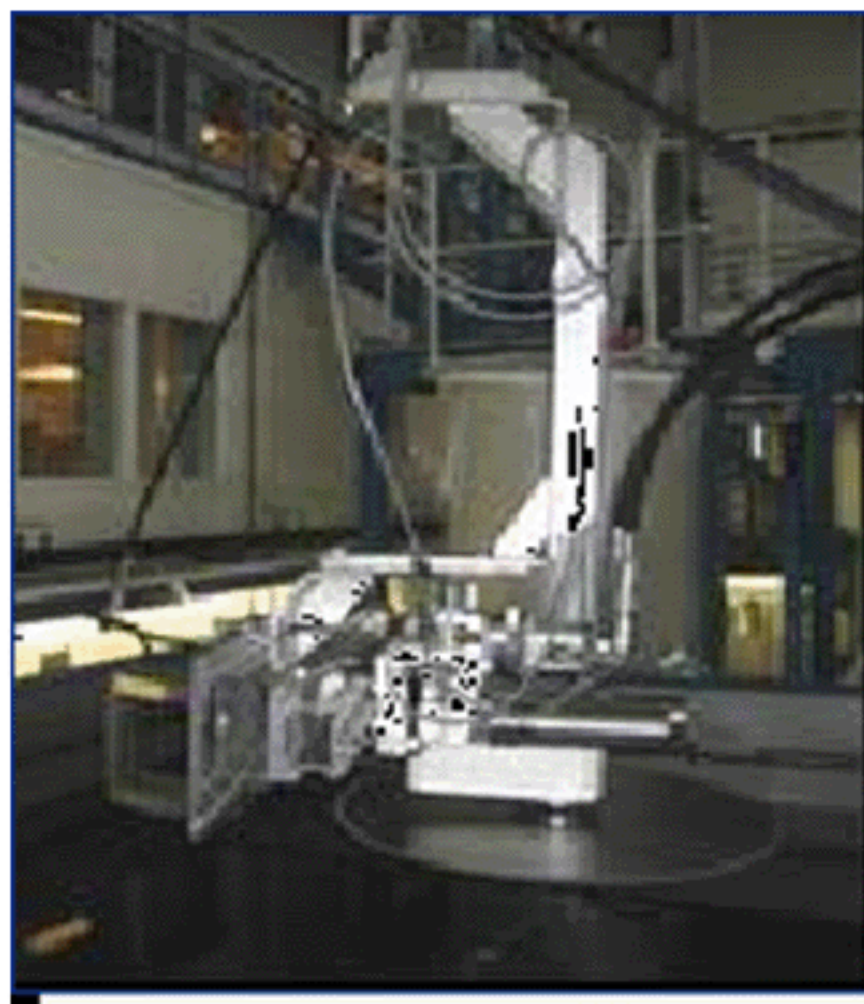
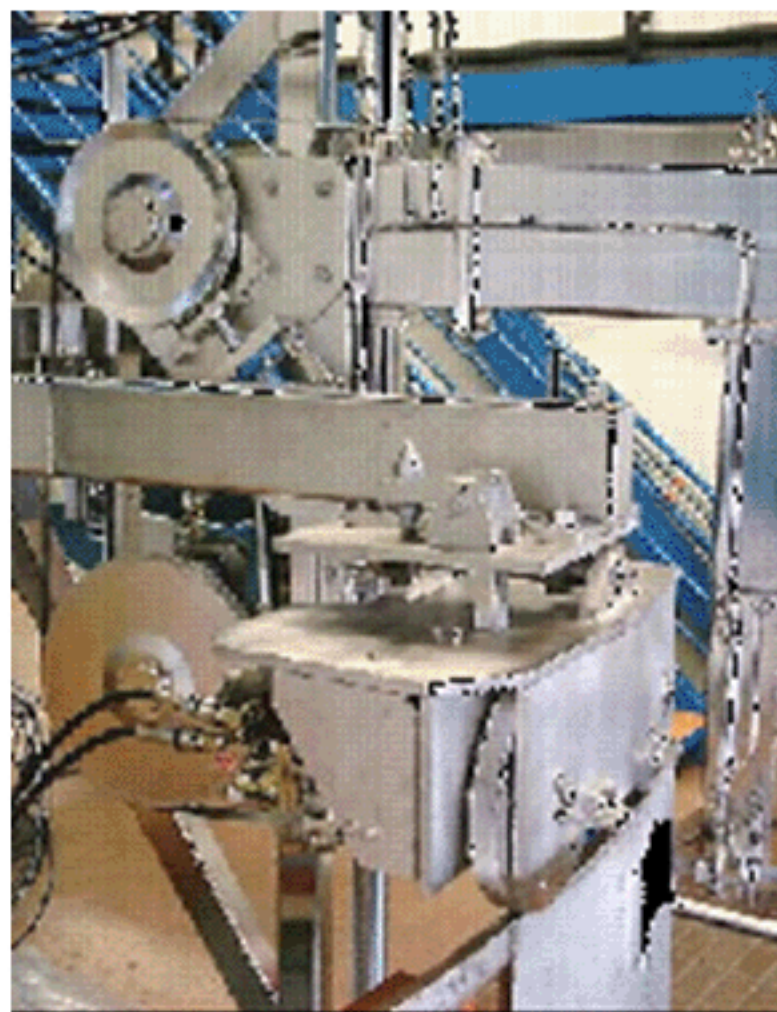


図7 バンドソー、ディスクソー及びせん断装置

[出典] Joseph Boucau, etc. "Chooz A, First Pressurized Water Reactor to be Dismantled in France - 13445", WM2013 (2013). (Fig. 4: Band saw, disc saw and shear tool)

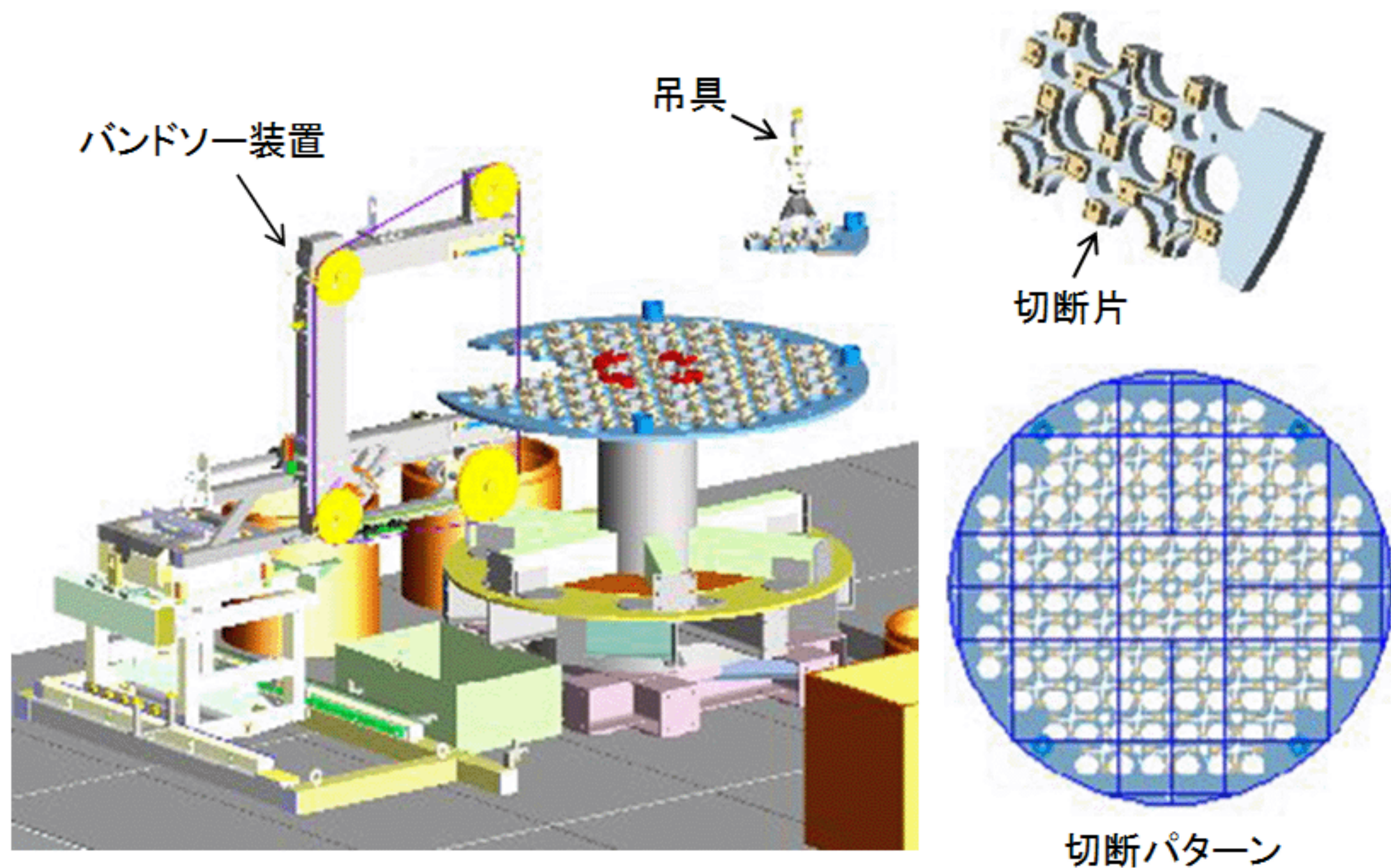
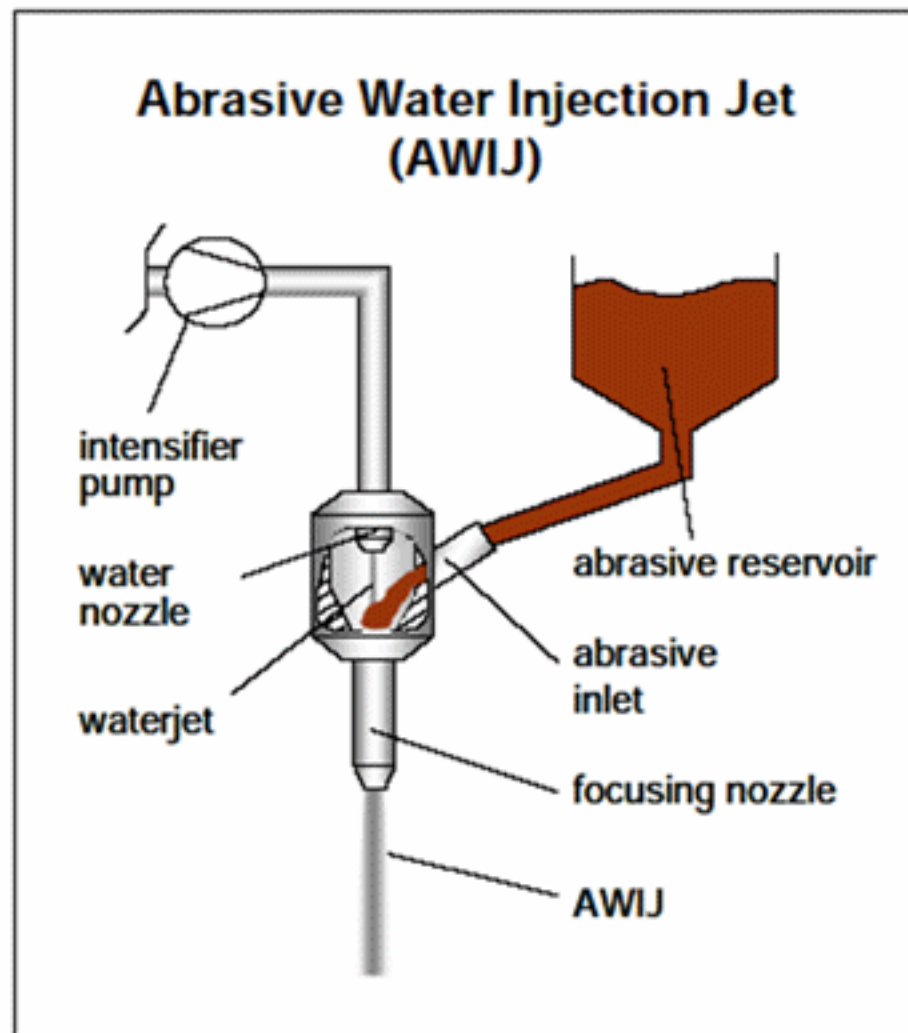


図8 上部炉心グリッドプレートのバンドソー装置による解体イメージ

[出典] Joseph Boucau, etc. "Chooz A, First Pressurized Water Reactor to be Dismantled in France - 13445", WM2013 (2013). (Fig. 5: Band sawing of the upper core plate)

(AWIJ: 空気、水及び研磨材を使用)



(AWSJ: 水と研磨材を使用)

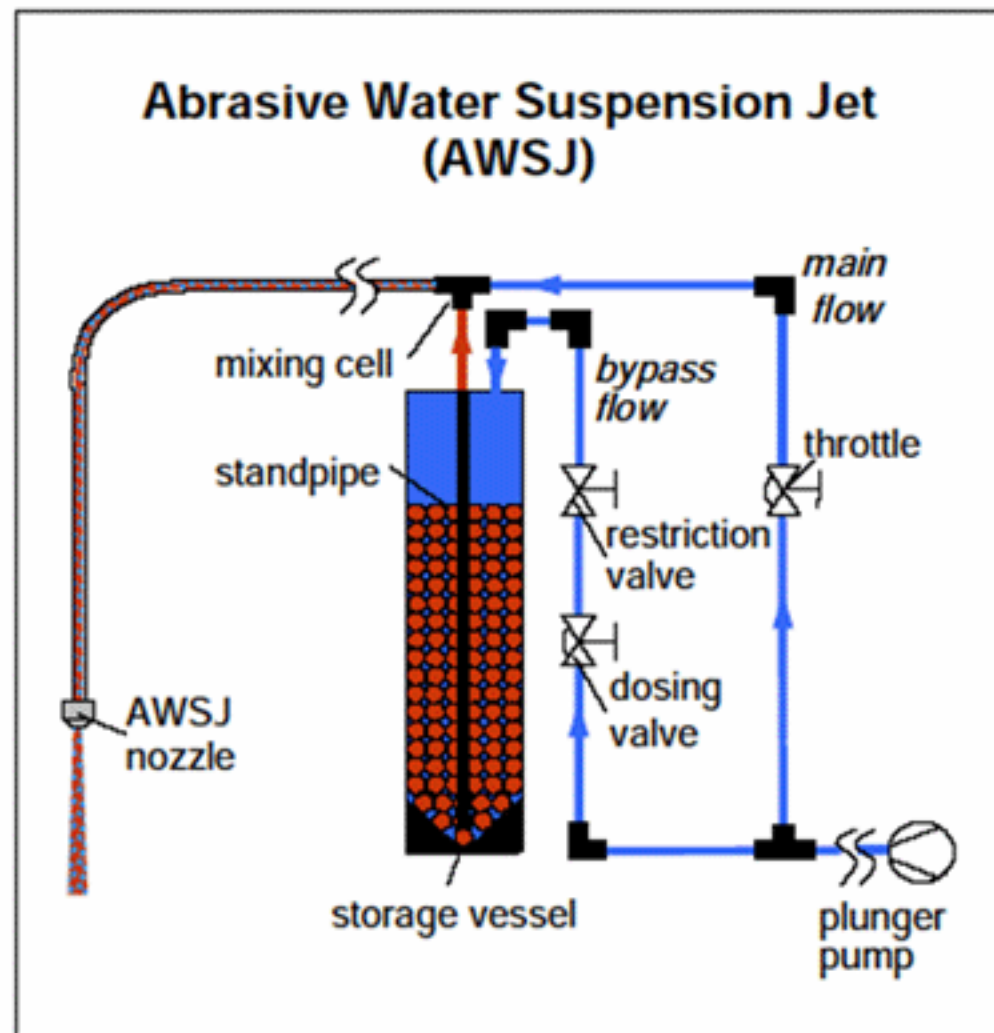


Fig. 1: Generation of abrasive waterjets

図9 研磨剤入り超高压水ジェットによる切断原理図 (AWIJとAWSJの比較)

[出典]KONTEC 2005

Further Developments of Abrasive Waterjet Cutting as an Universal Dismantling Technique

Dipl.-Ing. Dirk Peter, Prof. Dr.-Ing. Hartmut Louis, Dipl.-Ing. Thomas Senne, Dr.-Ing. Ralf Verseemann
Institute of Materials Science, University of Hannover / Ger

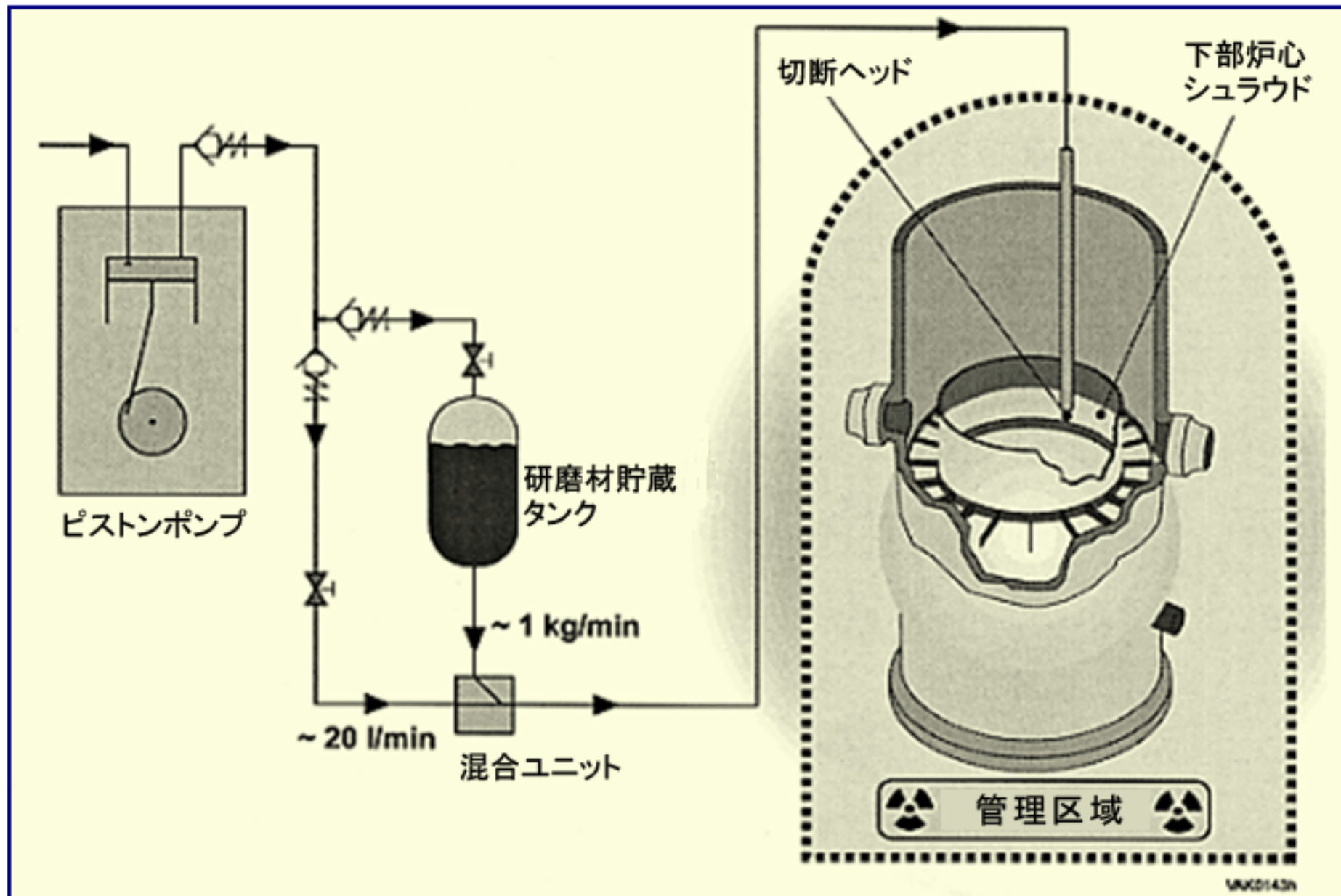


図10 研磨材入り超高压水ジェット(AWSJ)による
ドイツのVAK炉の炉心シュラウド解体への適用

[出典] H.H.Alba, N.Eickelpasch, D. Schmidt, H. Stener, Innovative Underwater cutting Procedures for the Dismantling of Two German Nuclear Power Plants, WM' 99, (1999. 04)

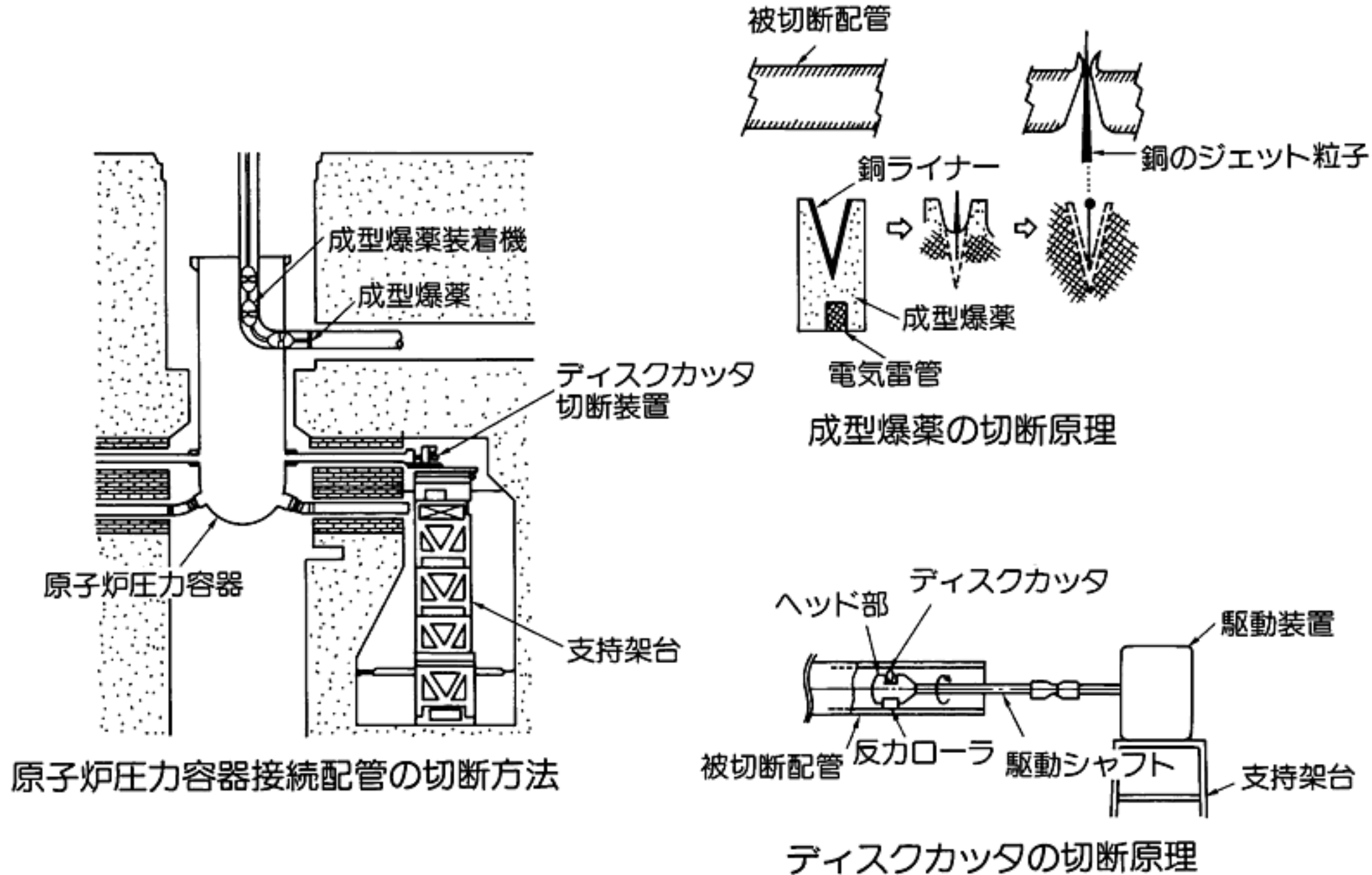


図11 原子炉压力容器接続配管の解体技術と切断原理