

# デコミッショニング技報

Journal of the RANDEC

巻頭言：線源の管理と被ばく経路の管理  
特集：東日本大震災・福島第一原子力発電所事故からの復興への展望（座談会）  
技術報告：チェルノブイリ事故後管理：チェルノブイリ原子力発電所4号炉の環境的安全状態への改造  
富士電機の原子炉廃止措置技術  
廃止措置に適用する測定・除染・解体技術

財団法人 原子力研究バックエンド推進センター

Radioactive Waste Management and Nuclear Facility  
Decommissioning Technology Center

# RANDEC

**RANDECは、原子力施設のデコミッショニング（廃止措置）技術の確立をめざした活動及び RI・研究所等廃棄物の処分地の立地等処理処分事業に関する調査等を行っています。**

## 事業の内容

デコミッショニングに関する試験研究・調査を行います。



デコミッショニングに関する技術・情報を提供します。



デコミッショニングに関する人材を養成します。



RI・研究所等廃棄物の処分地の立地等処理処分事業に関する調査等を行います。



デコミッショニング及び RI・研究所等廃棄物の処分地の立地等処理処分事業に関する普及啓発活動を行います。

# デコミッショニング技報

第44号 (2011年9月)

## 目次

### 巻頭言

線源の管理と被ばく経路の管理 .....	1
	栃山 修

### 特集

東日本大震災・福島第一原子力発電所事故からの復興への展望 (座談会) .....	2
	元自衛隊陸将補 武田能行氏、前原子力委員 松田美夜子氏、RANDEC 菊池三郎理事長

### 技術報告

チェルノブイリ事故後管理：チェルノブイリ原子力発電所4号炉の環境的安全状態への改造 .....	8
	ノルベルト モリトー、セシル ジャベュー

### 技術報告

富士電機の原子炉廃止措置技術 .....	20
	富塚千昭、水越清治、片桐源一 見上 寿、横田修一、村上知行

### 技術報告

廃止措置に適用する測定・除染・解体技術 .....	33
	廣川勝規、久田雅樹、福井康太、井上設生

# Journal of the RANDEC

No.44 Sept. 2011

## CONTENTS

### Featured Article

#### ROUND-TABLE TALKING

- Prospect toward the Restoration from the Great East Japan Earthquake and  
Fukushima-Daiich Nuclear Power Plants Accident ..... 2  
Yoshiyuki TAKEDA, Miyako MATSUDA, Saburo KIKUCHI

### Technical Report

- Post-accidental Management:  
Conversion into Environmentally Safe Conditions ..... 8  
Dr. Norbert Molitor, Cécile Javelle
- Technology for Reactor Decommissioning of Fuji Electric ..... 20  
Chiaki TOMIZUKA, Seiji MIZUKOSHI, Genich KATAGIRI,  
Hisashi MIKAMI, Shuuichi YOKOTA, Tomoyuki MURAKAMI
- Measurement, Decontamination and Dismantlement Technology that applies to Decommissioning ..... 33  
Katsunori HIROKAWA, Masaki HISADA, Yasutaka FUKUI, Setsunari INOUE

**ROUND-TABLE TALKING**

**Prospect toward the Restoration from the Great East Japan Earthquake and Fukushima-Daiich Nuclear Power Plants Accident**

Yoshiyuki TAKEDA, Miyako MATSUDA,  
Saburo KIKUCHI

J.RANDEC, No.44 (Sept.2011) page2~7, 4 Photos

The Round-Table Talking was hold on June 15 2011 under participation of three different experts, namely Mr. Takayuki Takeda who is a prominent Japanese expert of Disaster Mitigation Management (ex-Major General(MG) of GSDF), Mrs.Miyako Matsuda who is a critic of Life-Cycle Environment(Ex-Board of the Japan Atomic Energy Committee) and Saburo Kikuchi of the President of RANDEC with the theme "Prospect toward the Restoration from the Great East Japan Earthquake and Fukushima-Daiich Nuclear Power Plants accident.

**Post-accidental Management:  
Conversion into Environmentally Safe Conditions**

Dr. Norbert Molitor, Cécile Javelle

J.RANDEC, No.44 (Sept.2011) page8~19, 11 Figures

The management of post-accidental situation after a very severe nuclear accident is a very complex challenge which was extensively required for the first time after the Chernobyl accident.

In 1996 an international expert developed a "Recommended Course of Action" to convert the Chernobyl Nuclear Power Plant Unit 4 site into safe ecological conditions. The "Recommended Course of Action" resulted in the "Shelter Implementation Plan" which is a still ongoing major joint international effort to manage the post-accidental situation at the site. The current article gives a summary of key elements and the decision processes which led to its successful implementation.

**Technology for Reactor Decommissioning of Fuji Electric**

Chiaki TOMIZUKA, Seiji MIZUKOSHI,  
Genich KATAGIRI, Hisashi MIKAMI,  
Shuuichi YOKOTA, Tomoyuki MURAKAMI

J.RANDEC, No.44 (Sept.2011) page20~32, 28 Figures

Fuji Electric has participated in the construction of Tokai-1 power station of the Japan Atomic Power Company, has been conducting decommissioning R&D for commercial reactor, especially for gas cooled reactor in the field of system engineering, dismantling of reactor vessel and core internals with remote handling technologies, treatment and disposal of radioactive waste and residual radioactivity evaluation. Those R&D have been performed mainly under the umbrella of governmental organization, the Japan Atomic Power Company.

This paper gives a summary of the present status and accumulate technologies for decommissioning of nuclear reactor by Fuji Electric.

**Measurement, Decontamination and Dismantlement Technology that applies to Decommissioning**

Katsunori HIROKAWA, Masaki HISADA,  
Yasutaka FUKUI, Setsunari INOUE

J.RANDEC, No.44 (Sept.2011) page33~42, 17 Figures

In Japan Atomic Energy Agency, Facilities where the mission was finished and superannuation facilities are decommissioned systematically for rationalization and efficiency improvement of business. It is necessary to execute safe and economically by making good use of the technology according to the kind of facilities and the feature of the dismantlement object.

In this report, it reports on the radiation measurement, decontamination and dismantling technology that develops in the Waste Treatment Technology Section O-ARAI Research and Development Center JAEA.



## 線源の管理と被ばく経路の管理



原子力安全研究協会処分システム安全研究所  
所長 朽山 修

福島第一原子力発電所での事故は、地域の土地や建物、動植物、水等の、人々の生活環境を構成する物質を広く汚染する結果を招いてしまった。この環境の修復にあたっては、汚染物のリサイクルや処分の認可、食品等の出荷の制限、修復目標などに対して様々な「基準」あるいは「めやす」が登場してくる。このめやすは、線量や放射性物質濃度で表わされるが、それが直接健康影響の指標となっているとは限らないことに注意が必要である。

人々の被ばくを低減するには、「被ばくのもととなる線源」を管理する方法（隔離・閉じ込め）と、線源から「人々が被ばくする経路」を管理する方法（遮蔽・距離・時間）があり、この方法の違いがめやすの値と意味を決めることになる。

計画被ばく状況の線量拘束値は、何らかの行為を計画するとき、その行為に伴って「管理された施設」から生活環境に流出する放射性物質の量をこれ以下の値で可能な限り抑制しようとするもので、被ばくのもととなる線源を管理しようとしている。廃棄物処分やリサイクルの「めやす」は、処分施設から漏れ出た線源が生活環境に入り、その環境にあるあらゆる物質を遍く汚染した時に、そこで生活する平均的な人が不可避免的に被ばくするであろう仮想的線量（計算値）を用いて決められる。これは、その程度以下なら、もともと汚染していない生活環境に入って流通してもよい、コントロールできなくなってもよいという許可値であるから、できる限り低く無視できるほど低い値が設定される。たとえば、第二種廃棄物埋設の事業については最も起こりそうなシナリオに対して $10\ \mu\text{Sv}/\text{年}$ というめやすが示されている。このような状況における線源の管理におけるめやすは、環境を不可避免的に汚染してしまわないという目的のもとに必然的に厳しい値となっているのである。

一方、事故により汚染されてしまった地域に制限付きで人の居住を認める場合（現存被ばく状況）においては、その地域の生活環境の中に分散して存在する線源からの人の被ばくを、線源を可能な限り取り除くことと、被ばく経路を管理する（人の生活行動を管理する）ことにより、被ばくを下げようとする。その際に、線量をどの程度にまで下げようとするかのめやすを計画残存線量（参考レベル）として定める。このときには、できる限りきめ細かく個人の被ばくを管理するために、周知や教育の徹底を行い、人々の自助努力に期待する。これは実際に人々が被ばくするであろう線量なので、健康影響に結びつく値として設定される。ただし、この場合にも、このような地域から物品や食品をリサイクル、処分、放出、出荷する場合にどのような「めやす」に従うべきかが問題となる。これは、そこに居住している人々が汚染の状況をもたらしたわけではないが、汚染された地域と汚染のない地域の間で物質のやり取りであるので、やはり計画被ばく状況の厳しいめやすに従う必要がある。このルールを守らなければ汚染のなかった地域も汚染され、さらに外の世界から汚染地域と同様に見なされることになるという不都合が生じるからである。

環境の修復においては、住民との間で、こうしためやすの意味と目的を丁寧に説明し、周知や教育を徹底して、住民の理解と協力を仰ぐことがなによりも重要になるだろう。

## 座談会の開催

### 「東日本大震災・福島第一原子力発電所事故からの復興への展望」

元自衛隊陸将補 武田 能行氏、前原子力委員 松田 美夜子氏  
RANDEC 菊池 三郎理事長

#### **ROUND-TABLE TALKING**

#### ***Prospect toward the Restoration from the Great East Japan Earthquake and Fukushima-Daiich Nuclear Power Plants Accident***

Yoshiyuki TAKEDA<sup>\*1</sup>, Miyako MATSUDA<sup>\*2</sup> and Saburo KIKUCHI<sup>\*3</sup>

さる6月15日(水)に、「東日本大震災・福島第一原子力発電所事故からの復興への展望」をテーマにして、元自衛隊陸将補であり防災専門家の武田能行(たけだ よしゆき)氏、前原子力委員であり生活環境評論家の松田美夜子(まつだ みやこ)氏をお招きして、当財団理事長菊池三郎の3氏による座談会を開催いたしました。(場所:原子力機構青山分室、司会:当財団武田企画部長)

The Round-Table Talking was hold on June 15 2011 under participation of three different experts, namely Mr. Yoshiyuki Takeda who is a prominent Japanese expert of Disaster Mitigation Management(ex-Major General(MG) of GSDF), Mrs.Miyako Matsuda who is a critic of Life-Cycle Environment(Ex-Board of the Japan Atomic Energy Committee) and Saburo Kikuchi of the President of RANDEC with the theme "Prospect toward the Restoration from the Great East Japan Earthquake Catastrophe and Fukushima-Daiich Nuclear Power Plants accident.

○今回の大災害をどのように受け止めたか

松田:起こってはならないことが起こったという感じですが、必ず回復できるという思いがあります。それはエネルギー政策に関ってきた者として必ず日本を復活させる、させていこうという気持ちです。

私の専門分野は廃棄物ですので廃棄物のマネジメントを日本から国際社会に発信していけるように、現場の方と一緒にやってやりたい。

武田:「起こってはならないことが起こった」というのはすごく実感があると思ってお聞きしました。私は18歳で防衛大学に入り、自衛隊退職後も自衛隊関係の仕事をやってきましたから、戦後の自衛隊がどれだけ差別を受けて皆が悔しい思いをして仕事をしてきたか良く分かります。原子力発電は自衛隊と同じように第二次大戦前の負の遺産を引きずって、本当に重要な国の政策でありながらこれまで針のむしろのような共通したシンパ

\* 1 : Ex- Major General(MG) of GSDF(Ground Self-Defence Force),

\* 2 : Ex-Board of the Japan Atomic Energy Committee

\* 3 : President of RANDEC



Mrs. Miyako Matsuda

シーを感じて来ました。

私はこれまで東海村やいろんな原発の見学に行きましたが、ここまで気を使って言葉を選んで対応されているかというのを見た時に自衛隊と同じだなと思いました。しかし、それは事故が起きる前までの私の感想でして、事故が起きてからは別に色々なことがわかってきました。最も重要なことは、一旦、人のコントロールの手から離れた原子力というものは、制御が難しく、何人も手のつけようのない化け物だということです。津波の被害は一過性ですが、原子力事故の後始末には数十年という膨大な時間と費用と被災者の犠牲的忍耐が必要だということです。

菊池：私のように物心がついた時から原子力をエネルギーとして使おうと思ってきた人間としては、自然災害と原発事故は別の問題として考えなければいけない問題と思っています。短期、中期、長期の3つに分けて対応を考えるべきで、短期では当座我々が経済活動をしていく上でエネルギーをどうするべきか。中期では事故を起こした福島原発をどうするべきか、長期的には人類が核のエネルギーを使う前提でバックアップシステムや人為的な問題をどう防ぐかを含め制度的なところも考え直さなければならぬ。

○災害復旧活動について神戸大震災との違い

武田：神戸大震災の時は私は自衛官として3カ月くらい神戸にいましたが、6443人の死者に対して最終的な行方不明者は3人でした。また、阪神の場合は東西20数km、南北3～4kmの断層地帯に

乗っている神戸や西宮、芦屋といったエリアに被害は集中していましたが、今回は南北500kmの東日本全体が被災し、地震に加えて津波と原子力事故が加わりました。津波はすごい破壊力で（6月時点）約2万5千人という死者・行方不明者が出る大惨事となりました。とりわけ行方不明者の約8千人を如何に捜し出すかというのが今回の被害の阪神にない特徴です。本来行方不明者の捜索は警察の仕事ですが、まだ（6月時点）約7万人以上の自衛官が残って捜索しているのは行方不明者捜索の目処を付けないとその次の復興の策が打てないからです。法的には行方不明者は生存しているという前提で扱うので、勝手に家を排除したり土地を収用して別の目的に使用したりという事は現在の法律では出来ないのです。また、原子力災害は、「阪神」とは全く異次元の災害です。



Mr. Yoshiyuki Takeda

○福島原発事故を踏まえた問題点について

松田：原子力委員の時に、軽水炉は技術開発は既に終わっていると言われたんですが、私は事故を起こさないためには安定した技術でも更なる安心できる技術を進めていくための予算を付けなければと言ったんです。本当に使わなくては行けない技術的な予算が段々少なくなっているという傾向に矛盾を感じていました。また、省庁再編で効率効率と言い過ぎた中で原子力という日本の大切な科学技術開発の予算がどんどんつかなくなっています。

菊池：日本が原子力委員会を作って原子力の平和利用がスタートした時は核燃料サイクルは国有

で、その後法律を変えて民間にもできるようになり、それが今の青森県六ヶ所村のサイクル施設になるわけです。科学技術庁は一種の原子力庁でしたから。韓国やフランスでは、原子力の省庁は一本です。日本もエネルギー省なり原子力庁でやらないと。今回も東電を批判するのではなくて、もう原点に戻り仕組みを作り直さないと。成功している国もあるわけですから。

武田：マスコミの報道を聞いていると東電の経営陣も監督官庁も政府の専門家といわれる方々も現場経験がないために、本当に原子力の恐ろしさを熟知してきたとはとても思えません。徹底的に(事故の原因を)調査して今回の事故の教訓を洗い出し、それをどのように関係者の意識、制度、組織の改革に生かすのかが今後の最大のポイントです。全ての情報と改善事項を公にし、ここまでやりました、だから原発を再開させて下さい、今後は全て政府が責任をとりますと言わないと国民は納得しないと思います。

松田：SPEEDIの公開を早くするように何度もメールを送ったのですが。きちんとしたデータが早く出ていれば20キロ圏外の飯館村に一番放射能が降ったというのがわかっていたはずでわざわざ飯館村に逃げないようにする方策もあったと思うんですよ。

#### ○危機管理について

武田：私は自衛官を退職するまで「戦闘状況下で如何に任務を達成するか」だけを目標として生きてきました。要するに危機管理の訓練を受けてきたんです。危機管理で最も難しいのは、自分が今立っている状況で最悪の場合でも最小限何を為すべきか、即ち危機管理の達成目標を決めることです。

今回の福島原発の事故では、最初の24時間で1号機を水素爆発させ膨大な量の放射能を全国にまき散らしたことは明確に危機管理の失敗です。しかし、この水素爆発の経験を生かせず更に2日の間に3号機、2号機・4号機と全ての原発の水素爆発を許したことは、更に大量の放射能汚染を引き起こし、その後の事故処理を著しく困難にし、長期化させてしまったという意味で致命的な失敗でした。

目下非難は、この間の(当時の)菅総理大臣の言動に集中していますが、むしろ原発現場の状況判断と東電首脳的意思決定の経緯、政府を補佐する立場の原子力安全委員会や原子力安全・保安院の総理・所轄大臣への補佐の実態、諸外国特にアメリカ、フランスの助言内容と政府・東電の反応等殆ど明らかになっていません。こうした事実関係の中に貴重な教訓が眠っており、各人の保身のためにうやむやで終わってしまうのは余りにも情けない話です。

菊池：ごもっともな指摘だと思います。平時ならば東電がマニュアルに沿って法律の何条をみて保安院の許可を得てから、こういう作業をするという手順を踏んでいくんですが、あの事故時は平時ではなく緊急事態ですから任されれば現場の所長が(迅速な判断が)できたと思うんです。総理が危機を宣言して、現場に作戦を任すというやりの方が早いんじゃないかと。現場の人間は2、3号機も爆発が起きるんじゃないかという恐怖感があったのではないかと思います。



Mr. Saburo Kikuchi

#### ○環境回復について

松田：どんなにコストをかけてもいいから1ミリシーベルトを目標に(環境を)綺麗にしないと原子力の再開はあり得ないのではないのでしょうか。私たちは電気のお陰でここまで豊かになり便利に暮らしています。負担は国民共同でとるべきです。それは現地の人に対する誠意だと思うんです。

武田：今の様な政策過程を踏んでいる限りは殆ど

何もできないんじゃないかなんて気がします。松田先生も仰られたように、一つ一つの重要なテーマを解決していくために権限を持っている人が専門家のいろんな意見を聞いて自分なりの指令を出すじゃないですか。問題は指令の出しっぱなしでなく、それを実行させるため法律、規則、政令等にブレイクダウンして実行できる根拠を創り予算を組んで、これにもとづき官僚組織がフル回転で働くという行政的な手順を踏まないとい何も進みません。自衛隊もそういう意味では国家の危機管理を受け持つ行政組織の一つです。

菊池：福島復興について我々はどうのように放射能を取り除けばよいか、取った後はどう管理するか等提案をしています。福島県エリアを綺麗にしようということですから、福島県主導でやってほしいと私は思います。

#### ○エネルギーの安全保障と国民生活の問題

松田：武田さんみたいな専門家の方と別の視点なのでお許し頂きたいんですけど、戦後60年の中で私達が起こしたエネルギー問題の現実を目のあたりにしたという思いがあります。国民もそのことに気づいてほしい。だから誰も批判してはいけなし、かといって私たちも努力もしなければいけない。もっと正確に原子力エネルギーについて国民は勉強していくということが大切です。そして政治家を見張るといこと。誰にもおもねずに、エネルギー政策についてもっとどどん言える国民を増やしていく。政治家としてやらなきゃいけないことはたくさんありますよ。原子力業界の方にも言わなきゃいけないことが沢山あります。

武田：東日本大震災は、第二次大戦後最大の被害が出た有事ですよ。戦後66年間、基本的に我が国は平和で安全で豊かで便利で戦争の不安のない日常が続いてきました。自分の親も子供も孫もそういう環境を享受して生きて来ました。そうした危機感の希薄な人達に危機管理とか常に最悪の事態を想定して生活しろと言っても、動物的本能が萎えてしまっているわけですから無理な話だと思います。

私だって阪神大震災の出動体験はありましたが自衛官として実戦で命のやり取りをした経験はありません。戦後はそういう時代だったんです。

平和は永遠に続く、国家的有事はない、を前提とした社会であり、政治であり、経済、原子力政策でした。しかし今回の大震災を経験し、これまでは好条件が、たまたま66年続いただけだと頭を切り替えるべきだと思います。

外国からの侵略なんてありえないと言っていたましたが、近隣諸国との国力の逆転や接近により尖閣、竹島、北方領土と諸外国の脅威を身近に感じるようになってきました。

国家にとって次の最悪の事態はなんだということを考えるべき時です。私はアメリカとの同盟関係が維持されている限り現実的な最悪の事態は、首都直下型地震と東海地震だと思います。とりわけ東海地震については、菅総理が今回浜岡原発を止めましたが人気取りとかではなくて、理由をもっと正直堂々と理由を国民に訴えるべきです。現在福島原発の半径30キロ圏内に人も車も入れませんが、浜岡原発が同じ状況になったらどうですか。30キロの円を描いてみてください。新幹線も東名も東海道線も1号線も皆入ってしまいます。即ち浜岡原発が同様の事故を起こした場合、関西圏と関東圏が分断され物流が止まるということですよ。日本が社会的・経済的な一体感をなくして崩壊することだと思います。国家の最高責任者としては、今国家の危機管理として最も大事なことは何かということをも信念をもって国民に訴えるべきです。

松田：今回の事故の場合、国民を過剰に混乱させてはいけないという政治的な配慮があったのかもしれない。おそらく、そうだったのだろうと思います。しかし、それがかえって国民の信頼を失くしてしまいました。

菊池：一番インパクトがあるところをやられたら困るからっていえば皆納得する話だったんじゃないかなと思うんです。エネルギーセキュリティもそうだし、エネルギーがなければ日本は沈没しますから。まず天変地異も想定しなければいけないけど、エネルギー危機というものも考えておかなければならない。経済活動にも我々の健康にも響く話です。どういったエネルギーをどう確保していくかっていうことを冷静に考えなきゃならない。もちろん太陽も風力もいいでしょうし、全体として何で支えて行くかっていうことを考えなけ

ればなりません。いくら節電しようと、やはり天然ガスと原子力で基盤を支えなきゃならないことは変わらないと思います。太陽メガソーラーを作るにしても10年はかかります。間に合う話ではありません。現実的に何で確保するかというと、原子力の安全性を高めていって、皆さんに納得して頂くということを我々は提示して行かなければいけない責任がある。そういうことに「原子力村」は頑張っていけないといけないと思います。そのためには制度の改革とか技術的な改革の提示とか、合わせて示して行かなければならないのではと決意はしています。それを素直に政策として受け入れて出せるような業界であって欲しいし、政治であって欲しいと思います。あと個人的に日本を見た時に、東から西まで回って見たんですけど、大阪より西の方は関心が薄く違う国のようです。そういう中で危機管理をしていく難しさがある。日本全体としてどうまとめていくかということが極めて重要です。復興にしても、西の方に負担していただかなければならないところもありますよね。そういう一体感をどうやって高めていくかということが、国のセキュリティとして大事だなどと思います。個人それぞれが意識を高めていけるような政治を作ることが大事であり、若い人の教育の在り方を考えていかなければなりません。それがすべてのベースになるんじゃないかなと思います。



Round Table Talking

### ○最後に一言

松田：私は国民レベルでやることと、政治レベルで考えること2つがセットにならないといけないと思っています。私は国民レベルの視点でお話をしましたが、武田さんのお話がすごく面白く思います。やはりエネルギー省を早急に考えて行く、そのなかに危機管理を取り込んでいくので防衛省もエネルギー政策の一役をになっただけでなく、それが大切だと思います。エネルギー政策は国防と深くかかわっていますから。

私達は自衛隊のおかげで保障されているということを国民がもっと認識すべきです。私は専門が廃棄物と環境政策でヨーロッパのエネルギー政策の取材を20年継続して行なっています。スウェーデン、フィンランド、フランスも他国が攻めてきたらどうするっていう危機管理の中でエネルギー政策をしています。スウェーデンやフィンランドは人口800万位の国ですが、各建物の地下に防災倉庫があって一月が暮らしていけるみたいな国防意識です。びっくりします。どこの国も自国を守るために教育も必死です。そのような国を守るといって危機管理の話って日本で誰も言わないじゃないですか。武田さんにもっとマスコミに出て頂いて、どんどん話して頂ければ国防とエネルギー政策の理解は進みますね。エネルギーと国防はセットですよ。アメリカもそうですよね。

武田：日本が非常に特異と言われるのは敗戦による戦争否定・原爆否定というアレルギーが強くて、冷静な目で国家間の力関係の現実とか国際情勢の国内への波及といった常識的なことが理解できない。理解する土壌を政治も教育も怠って来たし、マスコミも怠って来た。国家の権力は批判の対象ということで甘えてきたわけです。それが今回の大震災で大きく変わりつつあります。それは自衛隊の大活躍によって、色眼鏡なしに自衛隊が本来必要な組織だと言うことが事実によって証明されたこと。国の背骨だという意識が国民の中に出て来たのではないかと思います。

私は、もう一歩進んでこの機会に憲法の権利と義務の規定をもう一度見直し日本人の間に正しい国家観を呼び戻すべきだと思っています。即ち個人は等しく国家や社会という公の存在があって生存が可能となります。従って個人の権利を擁護し

てくれる公の力に感謝し奉仕する義務があることを自覚すべきです。大きな国際社会の中で生きて行く国家という視点を子供に教育し、そういう国際的な視野を持った大人を今後20年30年と費やして育ててゆくのが非常に大事だと思います。

菊池：今日は主催者という立場です。原子力と防衛と市民生活という観点からの切り口でお話をさせて頂きました。RANDECは大学・民間等研究施設から発生する低レベルの放射性廃棄物を安全に処理・処分していこうという団体です。RANDECとしても、これまでの知見を生かして福島原発事故により環境に放出された放射性物質の除染後に発生する放射性廃棄物を、いかに安全かつ適切に処理・処分していくことが大事であるか提言をして取り組んでいきたいと考えています。引き続きご支援をいただければありがたいと思います。

本日はどうもありがとうございました。

(本座談会概要の構成及び内容は当財団の責任編集としております)

[武田能行氏]

1947年生まれ。1969年防衛大卒(第13期)。陸上自衛隊福知山第7普通科連隊長(神戸大震災対応)、第5師団副師団長、警務隊長、小平学校長等を歴任。陸将補(旧少将)で退官。

[松田美夜子氏]

1941年生まれ。1963年奈良女子大学卒。生活環境評論家(ごみとりサイクル)。富士常葉大学環境防災学部教授を経て原子力委員。現在NPO「持続可能な社会をつくる元気ネット」顧問、経済産業省認定消費生活アドバイザー。

## チェルノブイリ事故後管理： チェルノブイリ原子力発電所4号炉の環境的安全状態への改造

ノルベルト モリトー\*、セシル ジャベール\*

### *Post-accidental Management: Conversion into Environmentally Safe Conditions*

Dr. Norbert Molitor\* and Cécile Javelle\*

非常に大きなシビアアクシデントが起こった場合の事故後状態管理は、チェルノブイリ事故後に世界が初めて経験したように広範囲な対応が必要となる複合的な挑戦（難問）である。1996年、専門家はチェルノブイリ原子力発電所4号炉を環境的に安全な状態に向けて改造する“推奨される行動方針”を作成した。この行動方針は、“石棺実施計画”となって現在もサイトにおいて事故後状態を管理する重要な国際共同作業として進められている。

本論文では石棺実施計画を成功裏に導いた主要な要因と決定プロセスをまとめ報告する。

The management of post-accidental situation after a very severe nuclear accident is a very complex challenge which was extensively required for the first time after the Chernobyl accident.

In 1996 an international expert developed a “Recommended Course of Action” to convert the Chernobyl Nuclear Power Plant Unit 4 site into safe ecological conditions. The “Recommended Course of Action” resulted in the “Shelter Implementation Plan” which is a still ongoing major joint international effort to manage the post-accidental situation at the site. The current article gives a summary of key elements and the decision processes which led to its successful implementation.

\*：ドイツ、プレジャディス（株）(Plejades GmbH - Independent Experts)

Dr. Norbert Molitorは、チェルノブイリの事故のあった原子炉サイトを環境安全状態へ改造する国際プロジェクトの決定及び実施準備の責任者、チームリーダーであった。Ms. Cécile Javelleはプレジャディス（株）の主任専門家で、チェルノブイリチームの専門家であった。プレジャディス社は各国及びIAEA等の国際機関における原子力施設解体、放射性廃棄物計画立案の独立コンサルタント会社で、Dr. Norbert Molitorは社長である。両氏は日本の原子力機関の業務経験を有す。

(Dr. Norbert Molitor was project director and team leader of the international projects preparing decisions and implementation of the international projects to convert the accidental reactor site in Chernobyl into safe ecological conditions. Ms. Cécile Javelle is lead expert at Plejades GmbH. She was the coordination and communication expert within the Chernobyl teams of Dr. Molitor.

Plejades is an independent consulting company working i.a. for nuclear facilities dismantling and radioactive waste management projects in different countries and international organisations including the IAEA. Dr. Molitor is managing director of Plejades. Dr. Molitor and Ms. Javelle also have working experience in the nuclear sector in Japan )

## 1. はじめに

重大な事故は1986年4月26日チェルノブイリ原子力発電所サイト（以降、ChNPP）の4号炉の原子炉（RBMK型）が爆発し発生した。原子炉建物は完全に破壊され核分裂性物質と放射性物質はサイト上方に放散され環境に放出された。

旧ソ連当局は即座に事態に対応した。特に、地域住民の避難、チェルノブイリ立入禁止区域の設定（CEZ：Chernobyl Exclusion Zone）、連鎖反応及び火災の鎮静化、原子炉残存物の冷却、及びシェルター建物の建設、即ち燃料や核分裂性物質の大部分含む原子炉の残存物の暫定封込を行うための所謂、“sarcophagus：石棺”の建設等に尽力した。

これらの安全面で即座に対応し異常な結末の緩和と軽減を図る措置は、その後引き続いて環境回復プロジェクトとなった。しかし、多くの対策が実施可能であったが、4号炉サイトの状況には変化がなく、かつ不満足な状態であった。その原因は、部分的には技術的課題があるが、利用できる人材・資源の制限、適切な措置についての相反する議論があって、石棺をコンクリートで強化すること及び/又は全物量を一枚岩の構造体の中に入れるという初期の計画は構造的及び安全上の憂慮から、これまで実施されなかった。

1991年にウクライナ共和国が独立し、同国は1995年にEU及びG7各国と、主に、損壊した原子炉サイトを安全状態に再構築するための合同事故後管理に着手することを謳ったMoU（覚え書）を交わした。1996年には国際専門家チームは技術検討“チェルノブイリ4号炉：短期及び長期対策”を行い、ChNPP 4号炉サイトを環境上安全状態に改造するための目的性、境界条件及び技術的選択肢の分析をし“推奨される行動方針”を作成した。この検討がウクライナとG7各国の1997年に決定され、実施されることになる“シェルター実行計画”（SIP：Shelter Implementation Plan）の共通の基本路線となった。SIPは効果的に実施され、実施期間中にいくつかの安全目標を成功裏に達成した。最近では、新格納施設（NSC：New Safe Confinement（通称、アーチ型ドーム））の建設段階に入り、その完了予定は2015年とされている。

## 2. 1996年におけるチェルノブイリ原子力発電所4号炉（ChNPP 4号炉）の状況

極めて困難な条件下で建設された“石棺”は暫定的格納機能を用意するために即座の事故対応措置の一部であって、必ずしも長期的に満足できる措置ではない。1996年に行われた主な挑戦を以下に示す。

### (1) ChNPP 4号炉のシェルター“石棺”の状態

#### 1) 建物は極端に高い放射線の下で建設：

成形コンクリートによって部分的にのみ強化できた極端にプレストレスされた建物廃墟の上に鋼製のプレハブ構成体を置いた。（セメントを注いだ空調の柱のようなもので支持構造としての信頼性は確認できていない。ほとんどの鋼製構成体は積んだままで接続されておらず、溶接やボルト固定されていないので、全体として建物の強靱性や安定性は弱い。

#### 2) 深い基礎によるサポートなく建設されたので地盤沈下によって石棺の躯体が傾くようになった。この傾きが躯体の弱体化の明確な気配となっている。

#### 3) 腐食及び風化によって構造体は劣化し、長期的な解決策となっていない。

#### 4) 石棺には気密性は無い。ダスト抑制システムは働いているが、開口部から環境への放射性ダストの放出及び水の取込は軽減されていない。

#### 5) 4号炉と3号炉の共用排気筒は大きく損壊し不安定である。排気筒が潰れ石棺に倒れると石棺に重大な損壊、場合によっては石棺自体が倒壊する恐れがある。

### (2) ChNPP 4号炉の放射能及び核燃料インベントリー

#### 1) 放射能インベントリーは $\gamma$ 放出核種が大部分であるが2千万キュリー（ $7 \times 10^7$ TBq）である。

#### 2) このインベントリーは受入れ不可能な状態の核分裂性物質が含まれている。（燃料要素、溶岩状の物質、コンクリートと核分裂性物質と定義できない混合物、散らばった核分裂性物質のような種々の燃料含有物質（FCM：Fuel Containing Material）、元来の燃料の主

要な部分の場所も不明であり、燃料とFCMの状態をコントロールできない。

- 3) 既存の作動しているモニタリング及び制御機器では中性子フラックスの揺らぎが確認され、局所的な臨界の可能性を否定できない。
  - 4) 構内の下部では、即座の対応の際の水が溜まっており、雨水は屋根の開口部を通して浸透し、湿式ダスト抑制システムは水スプレー方式であり、これらの水が放射性物質及び核分裂性物質と直接接触し反応する多量の水の存在要因となっている。
- (3) 労働安全及び作業条件
- 1) 原子炉建物構内への種々の進入通路と回廊及び建物部材は放射線的に、また物理的に不安定かつ不十分、場合によっては存在していないものがある。石棺内部での安全作業は実際には行うことができなかった。
  - 2) 石棺のすぐ隣では汚染が酷く外での作業も安全上の問題があった。
  - 3) ChNPPにおける如何なる活動においてもCEZ(立入り禁止区域)は例外的な境界条件を表している。
- (4) 隣接原子力施設との干渉性
- 1) 1000MWのRBMK型の3号炉がすぐ隣で運転されており、4号炉での作業と事故に対する追加的安全対策を行った。
  - 2) サイトでは、その他の原子力施設が運転または計画された(例えば、新中間使用済燃料貯蔵施設、廃棄物処理施設)。

#### < Diagram 1 >

### 3. 4号炉サイトの改造への優勢順位と決定

国際専門家チームは、4号炉を環境安全状態に改造するために、その目的の具体化に対する欠落した部分の分析を行うことを決定した。

専門家の間では、全体的な目的が人々と環境を防護すること、ここで人々の防護とは、公衆と作業員の防護であり、環境の防護とは、全ての放射性物質と核物質の安全保管を意味する、であるとの全体的な共通理解があった。

目的達成の方法について相反する多くの議論が交わされたが、議論を重ねることによって4号炉

は核物質の安全な最終貯蔵施設には改造できないことが専門家の共通の理解としてまとめられた。燃料等のインベントリー撤去が最終的に解決できる挑戦(努力目標)である、との結論が得られ、この目的は段階的な安全上のアプローチによりステップワイズに達成されうるものと考えた。主な決定は、放射性物質と核物質インベントリー処分

#### < Diagram 2 >

次のステップでは、具体的な対応は、人々と環境の防護の全体的安全目標を達成すべく特定の安全上の課題に体系的に取り組むことであると専門家は結論した。特定の安全課題とは;

- (1) 線源に関わるリスク
  - ①原子力安全：燃料/燃料含有物質(FCM)(核分裂性物質)
  - ②放射線学的安全：放射性物質
  - ③その他の危険物質：可燃物、爆発物、毒物
- (2) 運転上のリスク
  - ①危険作業、労働安全
  - ②ダスト、放射線
  - ③進入路、労働安全
- (3) 事故発生リスク
  - ①4号炉の崩壊
  - ②火災
  - ③緊急時最システムと準備

安全の課題と可能なカテゴリー(定義、組織及び実施レベル)を分類することにより、取組みが可能となる。これらの安全目標と関連する活動分類は早期実施の緊急性、成立性及び可能性によって分析される。これらは「緊急性」、「必要性」及び「要望される」種々の対策リストに載せられた。

優先順位を付けて目標と対策が決まれば、リスク軽減に関連する安全に基づく決定線図(decision tree)が準備できる。

#### < Diagram 3 >、< Diagram 4 >

優先順位の上位3つの決定は以下の通りである。

緊急対応でもって短期間に取り組むことのできる短期的リスクには資金化する。これは第一優先で資金化される(決定No.1)。次のステップは、インベントリーが残存するならば共通の国際的な基準に従って決定されなければならない(Decision

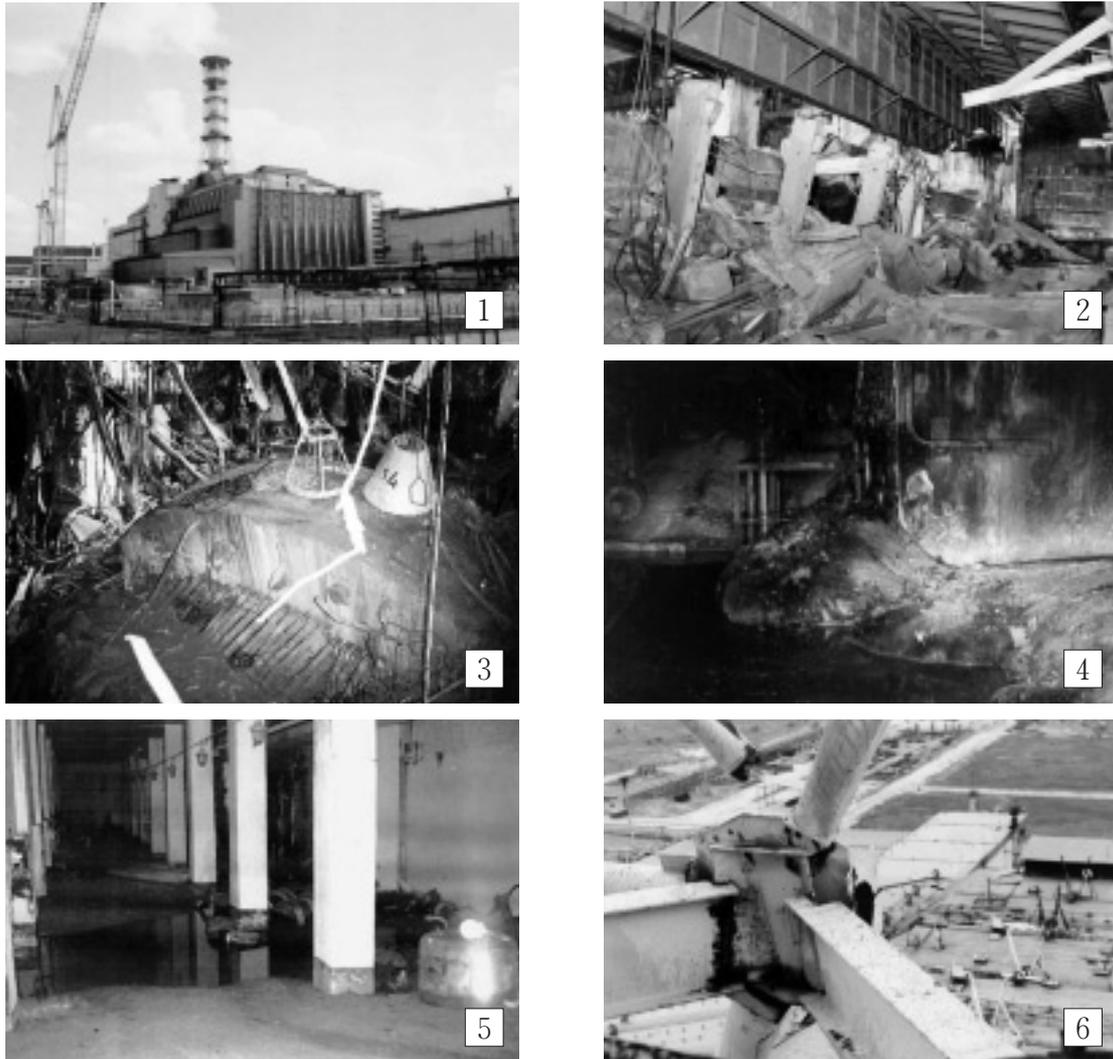


Diagram 1 Selected pictures to illustrate situation of ChNPP Unit 4 in 1996

- 1 : Existing Shelter (Sarcophagus), 2 : Inside Sarcophagus, 3 : destroyed reactor vessel,  
 4 : Lava like fuel “elephant foot”, 5 : water in the premises, 6 : destroyed node of ventilation stack

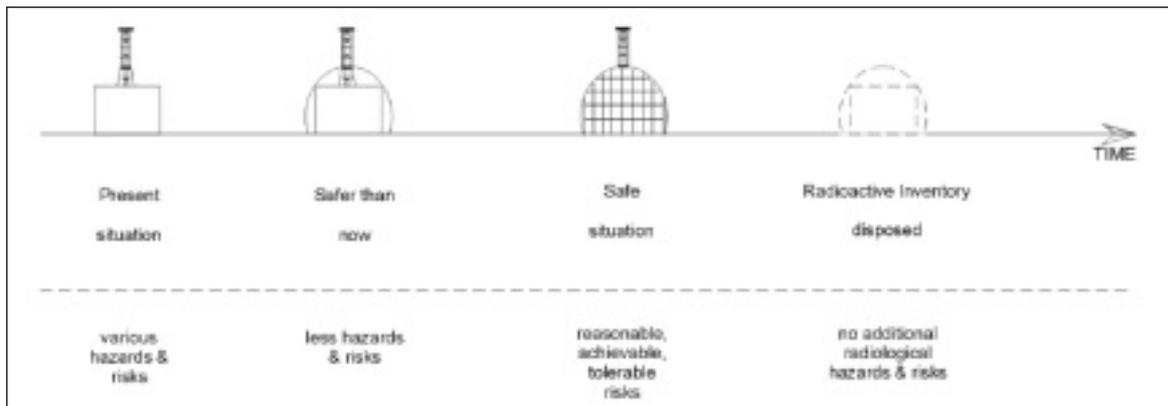


Diagram 2 Graded approach to convert Unit 4 site into environmentally safe conditions

Purpose		Create Ecological Safe Condition Protect Worker + Protect Public + Protect Environment																																											
Objectives		Source Control & Disposition						Risk Control & Reduction																																					
Subject		Radioactive Material		Other material				Operations		Accidents																																			
		Solid		Liquid		Non Recyclable		Recyclable		Radiological		Industrial & Security		Reduce Event Probability		Reduce Event Consequence																													
Action Categories		ditto		ditto		ditto		ditto		- Characterization - Organizational		ditto		- Define Critical Zone - Define Credible Collapse, Criticality and Fire event - Analysis, Measurements & Monitoring		- Monitoring Potential Pathways - Emergency Plans																													
No		D1		D2		D3		D4		D5		D6		D7		D8		D9																											
No		Control and Removal		Control & Disposition		Control, Store, and dispose		Control and disposition		Remove		Contamination Control		Exposure Control		Monitoring & Control		Upgrades		Collapse		Criticality		Fire		Air & Water		Direct Radiation		Emergency Equipment															
		Intermediate Store & Final disposition & Fuel Disposition		In-situ Near Surface Burial		Control Remove, Store, and dispose		In-situ Treatment Liquid Disposal		Recycle Store & Reuse										Stabilization Inside Outside		Partial Destruction		Mitigation		Defences		Confining & Monitoring		Shielding & Monitoring															
No		11		12		13		14		15		16		17		18		19		110		111		112		113		114		115		116		117		118		119		120		121		122	

Diagram 3 Safety issues to be addressed and action category

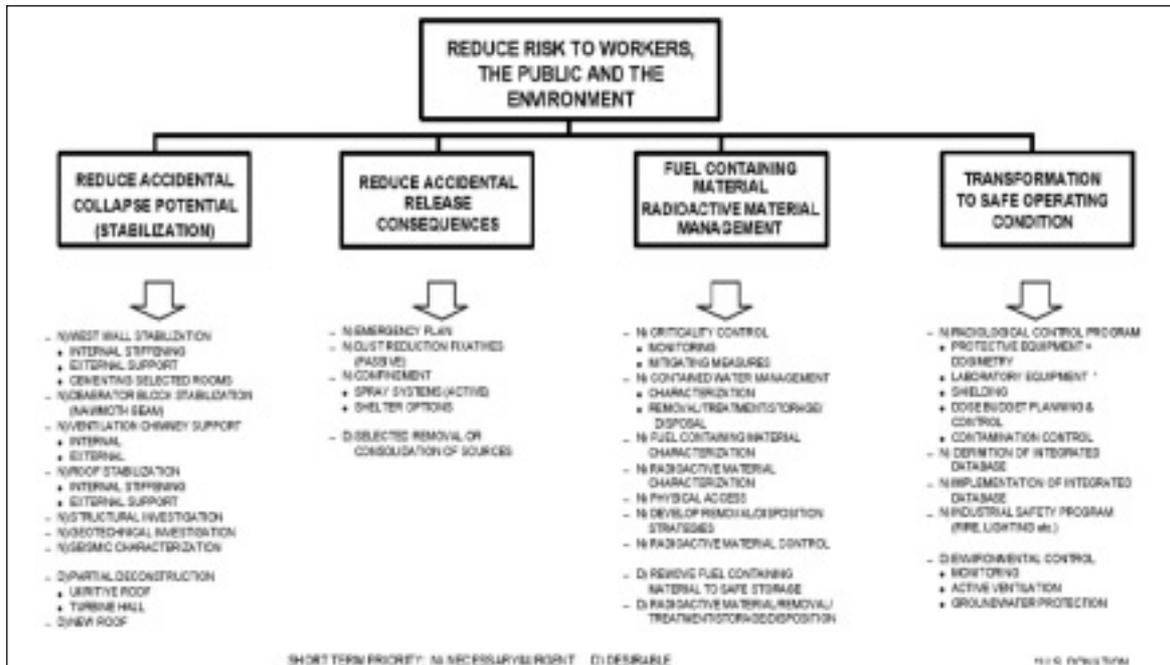


Diagram 4 List of measures and their priority

No.2)。4号炉の場合、サイトは国際基準に沿って処分場には改造できない、という共通な理解がある。

第3の決定は、インベントリーの除去の時期と処分場への移送であった。(決定No.3)

決定線図を以下に示す。

#### < Diagram 5 >

### 4. シナリオ分析及び推奨された行動方針

次の段階では、多くの専門家及び専門家機関が提案した全シナリオを成立性、実施上のリスク、費用及び工程の点で詳細に分析した。一つの特異なシナリオは“Alliance Study”と呼ばれたものであるが、損壊した4号炉、既存の石棺を安全に格納・内蔵できるサポート施設を持つ新規の長寿命のアーチ型2重壁コンクリートシェルターを建立する包括的な提案であった。これが建設後数百年間は安全とされている。

他のシナリオでは、既存のシェルター（石棺）を構造的に安定化させる、損壊した原子炉を継ぎ目のない一枚岩のコンクリート構造体の中に格納する、あるいは、軽量の格納構造体の建設である。以下の図は主な提案された選択の概要である：個々の提案シナリオ及び引続くそのシナリオの採否の比較分析の後、3つのフェーズに分岐する“推奨される行動方針”が作られた：

#### < Diagram 6 >

##### 第1フェーズ 安定化及び他の短期的対策

Task1.1：構造安定化によって崩落事故の確率を減少させる。この仕事は崩落のリスクが軽減することを目的に、格納施設内の不安定な部分を除去することによってそのリスクが消滅するまで行う。この仕事は、第2フェーズのTask2.1及びTask2.2と一緒に行われる。

Task1.2：崩落事故発生を軽減する。この仕事の目的はリスクが消滅するまで崩落事故の発生を軽減させる。実施時期（実施と工程）はTask2.1及びTask2.2と整合を図る。

Task1.3：臨界管理及び含有水管理により核的安全性を高める。この仕事は、モニタリングと管理

システムを統合し臨界及び含有水管理の改善を行うものである。

Task1.4：作業員、労働及び環境安全を高める。この仕事は、適切なモニタリングの定義付けと実施及び安全機器を含む。

##### 第2フェーズ 環境的に安全なサイトへの改造準備

Task2.1：最重要な短期的対策は既存のシェルター及びその内部で取組まれ、また非常に高い集積線量が見込まれるので、遮へいとダストの固定を設備することは当然である。これらは作業員の活動中の被ばくを減じられる何処でも設置する。この作業の実施によって、既存シェルターにおける作業の安全性が顕著に向上する。この作業は第1フェーズ短期的対策の実施と平行して行う。

Task2.2：費用効果で最適化された新格納施設の設計と建設は現在審査しているいくつかのものと類似している。この作業の範囲に含まれる屋根の部分的な解体及び不安定な部分の解体期間中の放射性物質の放出を防止または軽減する。この作業の完遂により、少なくとも、第3フェーズの実施の数十年間は必要となる新格納施設の寿命中には崩落のリスクは必然的になくなるであろう。

Task2.3：崩落のリスクがなくなれば、残るリスクはインベントリーの安全管理に関わるものである。この作業では、適切な除去技術と時期が焦点となる。インベントリーの大部分は次のフェーズでの遅延撤去の前に長寿命な安全構造体によって長期間In-siteで管理できる。しかし、以前の原子炉建物内の既知の到達可能なFCMの部分の現状はもっと安定な状態しなければならない状況である。即ち、できるだけFCMを選択的に取り出して処理しサイトに一時保管することが必要である。FCM除去の範囲は実施フェーズで出くわす技術的及び資金的制約で決められる。この取り出しは、成立してもオプション的なもので、これを実施するとしても、その受入れと次のフェーズの要件を緩めることに対しては大きな議論がある。従って、成立性と次フェーズの利点を含む除去戦略の調査が

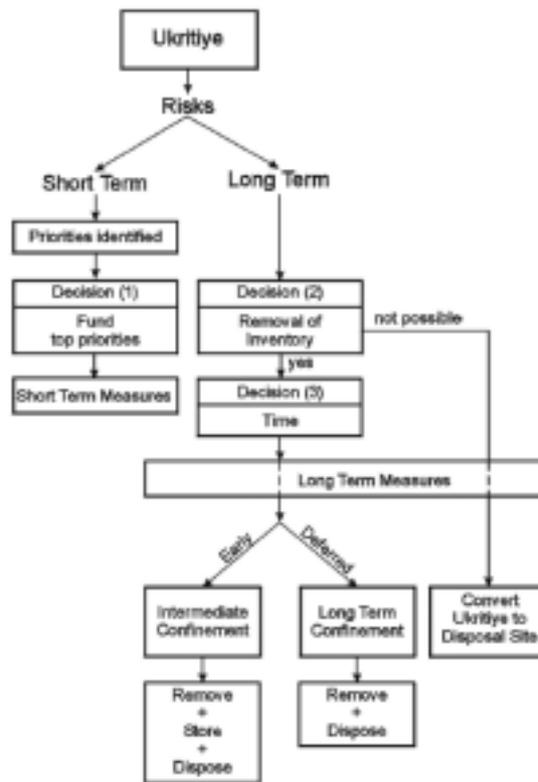


Diagram 5 Risk based decision tree

Baseline Scenario 1	Action Scenario 2	Action Scenario 3a	Action Scenario 3b	Action Scenario 4	Action Scenario 5.1	Action Scenario 5.2
Implemented Short Term Measures (see Scenario 2)						
Do nothing except continuing the present  Baseline for Comparison	Define and implement Short Term Measures Continue active risk management as long Term Measures	Build a small Shelter around existing Ukritye  Proceed to early removal	Build a long lived shelter to contain and confine Ukritye in case of collapse  Proceed to removal when it is appropriate	Contain and confine with a long lived Earth Shelter  Proceed to removal with access of heavy equipment if required	Shield, stabilize and contain with cementitious material and confine with a long lived Shelter  Proceed to removal when it is appropriate	Shield, stabilize and contain with cementitious material Keep inventory in place Proceed to removal if required

Diagram 6 Main Scenarios

FCMの早期の部分的除去の前に行われる。

### 第3 フェーズ 環境的に安全なサイトへの改造

このフェーズは、石棺の環境安全状態への推奨される改造である。実施の要件は、先行する2つのフェーズの達成結果による。提案された第1フェーズと第2フェーズの可能な次の対策と両立(技術的かつ資金的)することを実証することが求められる。

Task3.1: 既設のシェルターを土石、継ぎ目なし岩石または両方の原則を考慮した安全構造体に改造する。いずれの場合でも、仮に早期除去がされないとしてもアクセス可能なFCMにアクセスし管理できること、ならびに、内蔵する全インベントリーのモニタリングはしなければならない。

Task3.2: 安全構造体は撤去決定までの管理と維持を行う。インベントリーは遅延撤去期間までの数百年に亘り、その場に留め置かれる。

Task3.3: インベントリーは必要に応じ撤去する。その判断は技術及び資金の利用できるか、さらに環境上撤去が必要であるか、同時に前フェーズと作業の結果による。

上記の3フェーズはサイトの環境を安全にさせる枠組みを決めるもので、ステップワイズな方法かつ柔軟に決定を行い将来の活動の最適化を図るものである。推奨された行動方針は1996年4月から1997年12月の間に作成された。

## 5. シェルター実施計画 (SIP: Shelter Implementation Plan)

ウクライナ政府、G7各国及びEUは1997年初頭に“推奨された行動方針”の第一フェーズ(フェーズ1.2.1及び2.2)を実施することを決定し、決定と平行して、次のステップである(フェーズ2.3及び3)の準備を行うことを決定した。国際専門家チームは1997年にフェーズ1.2.1及び2.2をカバーするShelter Implementation Plan (SIP)の準備指示を行った。

国際専門家チームはWBS、作業手順、暫定的工

程及び予算に基づいて詳細部分及び作業プロセスを決定した。WBSの作成に当たっては、先行するステップで決められた短期的及び長期的対策と整合性のある主要な22作業を決め、“推奨された行動方針”の種々の安全目標に取り組むようにした。この作業手順の中に、10件のキーとなる標題的決定ポイントが決められ、SIPの詳細計画と実施の最適化を図った。

### < Diagram 7 >、< Diagram 8 >、< Diagram 9 >

SIP計画は、1997年2月から3月の間に準備され、G7各国の検討に付された。公式に1997年のデンバーでのG7サミットにおいて、計画を進めることが決定され、同時にSIP実施のための基金機構としてロンドンのヨーロッパ復興開発銀行(European Bank for Restoration and Development: EBRD)の管理下でチェルノブイリシェルターファンド(Chernobyl Shelter Fund: CSF)が設立された。EBRDは、CSFファンドを運営する規則と制度を創り、CSF資金保証会議が1997年ニューヨークで開催された。

## 6. シェルター実施計画 (SIP) の実行

SIPは1998年に開始され、2008年に重要な段階に到達した。安全性に関しても、同年には安定化作業が完了した。最後の主要な契約は新安全格納施設(NSC)であり2007年であった。シェルターの部分解体とそのFCM除去活動をサポートするNSCは2015年に完成する予定である。

### < Diagram 10 >

短・長期的対策プロジェクトの知見は、SIPの準備と実施を決定するための基礎となった。

2015年にSIPが完成すれば、ChNPP 4号炉サイトの事項後の管理に関して多くのことが実現される。NSC(新安全格納施設)は初期の石棺を安全に取り壊しでき、燃料、FCM及び放射能インベントリーの回収を可能とする。後者は、推奨された行動方針では、フェーズ2.3及びフェーズ3として表されるもので、現在のSIPではカバーされていないが、次の挑戦としてリスクの本格的な除去において事故後管理を完成させる重要な仕事である。SIPと同様に、以降の活動はChNPPサイトの他の安全改善活動、それには放射性廃棄物と

Diagram 7 Main Task of Shelter Implementation Plan(SIP)

<b>Objective - Reduce Collapse Probability (Structural Stabilization)</b>	
Task 1	Stabilization and Shielding Design Integration and Mobilization
Task 2	Stabilization and Shielding of Western Section
Task 3	Stabilization and Shielding of Mammoth Beam and Southern Section
Task 4	Stabilization and Shielding of the Eastern and Northern Sections
Task 5	Stabilization of the Roof, Roof Supports and Covering
Task 6	Structural Investigation and Monitoring
Task 7	Geotechnical Investigation
Task 8	Seismic Characterization and Monitoring
<b>Objective - Reduce Collapse Accident Consequences</b>	
Task 9	Emergency Preparedness
Task 10	Dust Management
Task 11	Emergency Dust Suppression System
<b>Objective - Improve Nuclear Safety</b>	
Task 12	Criticality and Nuclear Safety
Task 13	Contained Water Management
Task 14	Fuel Containing Material (FCM) Characterization
<b>Objective - Improve Worker and Environmental Safety</b>	
Task 15	Radiological Protection Program
Task 16	Industrial Safety, Fire Protection, Infrastructure, and Access Control
Task 17	Integrated Monitoring System
Task 18	Integrated Database (Configuration Management)
<b>Objective - Long Term Strategy &amp; Study for Conversion to Environmentally Safe Site</b>	
Task 19	FCM Removal and Waste Management Strategy & Study
Task 20	FCM Removal Technology Development
Task 21	Safe Confinement Strategy
Task 22	Implementation of Safe Confinement to Support Deconstruction and FCM Removal

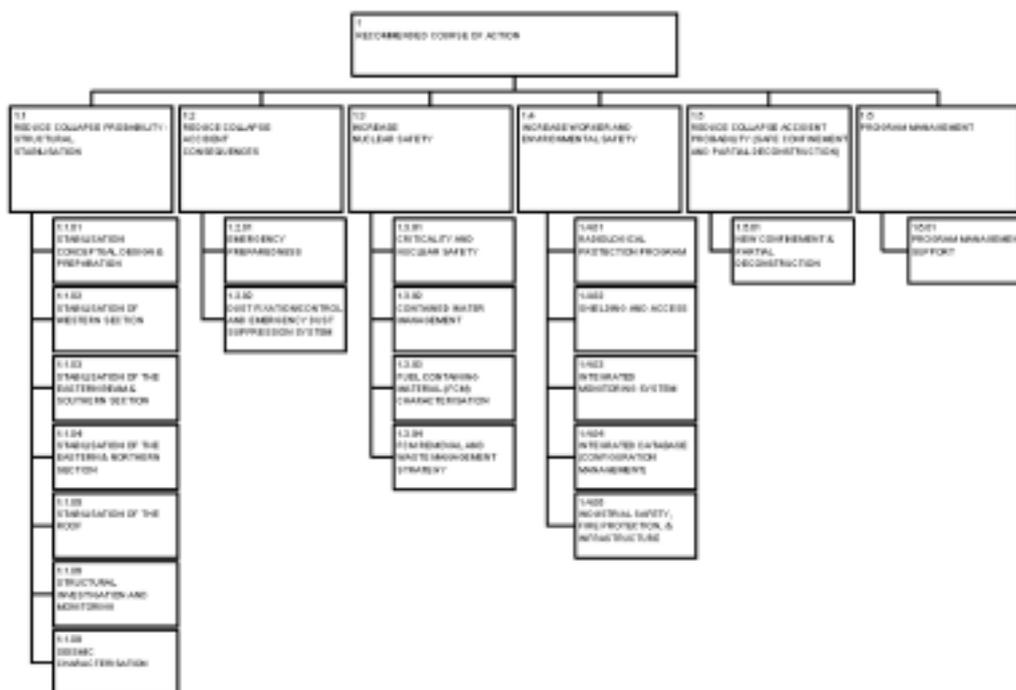


Diagram 8 Shelter Implementation Plan Work Breakdown Structure (WBS)

Diagram 9 Shelter Implementation Plan Programmatic Milestones

WBS	Milestone	Task	Milestone Description
1.1.01.33	P1 (Key)	Stabilization and Shielding Design Integration and Mobilization	Stabilization and Shielding Strategy Decision
1.1.05.49	P2	Stabilization of the Roof, Roof Supports, and Covering	Early Construction Decision
1.1.06.45	P3	Structural Investigation and Monitoring	Issue Structural Report / Monitoring Decision
1.1.08.47	P4	Seismic Characterization and Monitoring	Seismic Monitoring System Decision
1.3.01.87	P5	Criticality and Nuclear Safety	Criticality Mitigation Decision
1.3.02.23	P6	Contained Water Management	Water Management Decision
1.5.01.40	P7	FCM Removal and Waste Management Strategy and Study	Preliminary FCM Removal Strategy Decision
1.5.01.70	P8 (Key)	FCM Removal and Waste Management Strategy and Study	FCM Removal Strategy Decision
1.5.02.25	P9	FCM Removal Technology Development	FCM Removal Prototype Decision
1.5.03.43	P10 (Key)	Safe Confinement Strategy	Confinement Strategy Decision

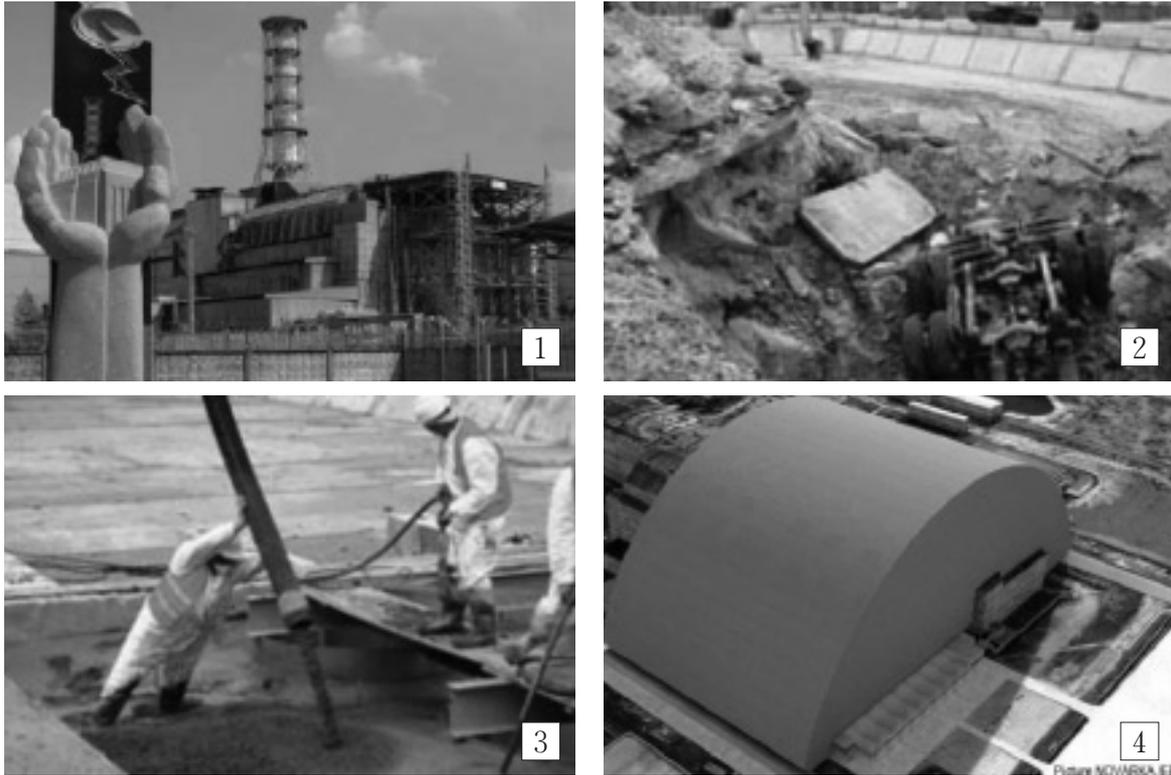


Diagram 10 Implementation of the Shelter Implementation Plan (SIP)  
 1 Stabilized Shelter, 2 Clean up of construction site, 3 Foundations for sliding NSC,  
 4 Completed NSC (model)

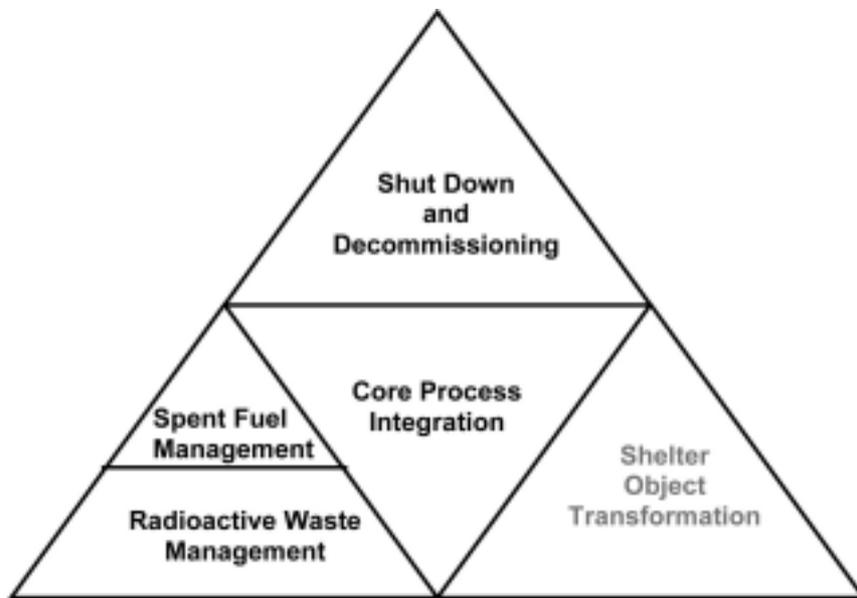


Diagram 11 Current Core Processes at ChNPP site

使用済燃料の安全管理、他の原子炉の運転停止と廃止措置があるが、それらと平行して両立するように実施しなければならない。運転者はこれに関して総合的なサイト挑戦に当たる手順を作成した。

< Diagram 11 >

チェルノブイリ原子力発電所の事例は、シビアアクシデント後の事故後の状態管理は効率的に実施できることを実証している、というのが著者の見解である。国際協力と連携の下で、最近の決定過程管理 (decision process management) 及び一貫した技術的アプローチが、挑戦に成功裏に対処し持続的な解決を図るキーとなる要因となる。

(本論文の日本語版は、著者の英文原文を著者の同意を得て当センター情報管理部において翻訳し掲載するものである。著者の意図と矛盾する翻訳がある場合の責任は当センターが負う)

参考文献

- 1) Molitor et al., Mutual Benefits During Decommissioning Projects in CEE, CEE Decommissioning & Waste Corporation, Presentation Berlin 18-19 June 2008
- 2) Molitor; Sicherung des Havarie-Reaktors Tschernobyl - Entwicklung und Stand der Projekte - Presentation at the 6<sup>th</sup> Darmstädter Kolloquium, 11 March 1999
- 3) Chernobyl Unit 4: Short and Long-Term Measures, final report, 29 November 1996, Tacis Services, DG 1A, European Commission, Brussels, Project Number 164.506.96
- 4) Chernobyl Unit 4 Shelter Implementation Plan, 31 May 1997, Tacis Services, DG 1A, European Commission, Brussels, US Department of Energy

## 富士電機の原子炉廃止措置技術

富塚 千昭\*、水越 清治\*、片桐 源一\*  
見上 寿\*、横田 修一\*、村上 知行\*

### *Technology for Reactor Decommissioning of Fuji Electric*

Chiaki TOMIZUKA \*, Seiji MIZUKOSHI \*, Genich KATAGIRI \*  
Hisashi MIKAMI \*, Shuuichi YOKOTA \*, Tomoyuki MURAKAMI \*

東海発電所の建設に参画した富士電機は、商用原子力発電所、特にガス冷却炉の廃止措置に係わるシステムエンジニアリング、遠隔解体技術、放射性廃棄物処理技術および残存放射エネルギー評価技術などの技術開発を日本原子力発電(株)殿や政府関係機関の傘下で取り組んできた。本報告は、これまでの技術開発の成果の概要について紹介する。

Fuji Electric has participated in the construction of Tokai-1 power station of the Japan Atomic Power Company, has been conducting decommissioning R&D for commercial reactor, especially for gas cooled reactor in the field of system engineering, dismantling of reactor vessel and core internals with remote handling technologies, treatment and disposal of radioactive waste and residual radioactivity evaluation. Those R&D have been performed mainly under the umbrella of governmental organization, the Japan Atomic Power Company.

This paper gives a summary of the present status and accumulate technologies for decommissioning of nuclear reactor by Fuji Electric.

#### 1. はじめに

我が国初の商業用原子力発電所である日本原子力発電(株)殿の東海発電所が、32年に亘る営業運転を終了し、2001年12月から廃止措置に着手している。

商業用原子炉施設の廃止措置には、計画段階から解体工事、廃棄物の処理・処分に至るまで幅広い分野の技術が必要である。また、解体に伴って

発生する放射性廃棄物を合理的に処理、処分するための指針や技術基準の整備が、処分場の設計工程にあわせて整備されつつある。

一方、解体中に発生する廃棄物のうち、放射性物質濃度が極めて低く「放射性物質として扱う必要のないもの」として他の放射性廃棄物と区分する制度(クリアランス制度)が法制化され、解体物の再利用が可能となった。

富士電機では、東海発電所の建設に参画して以

\*：富士電機株式会社 原子力・放射線事業部 原子力統括部  
(FUJI ELECTRIC Co.,Ltd, NUCLEAR POWER DIVISION,NUCLEAR PLANT & RADIATION SYSTEMS GROUP)

来、各種の原子力施設、核燃料サイクル施設、研究開発施設における原子力機器の設計・製作、建設・保守を通じて得られた経験を基に、日本原子力発電(株)殿や旧原子力発電技術機構 (NUPEC) 殿、日本原子力研究開発機構等からの委託研究や共同研究などを通じて原子炉施設の廃止措置に係わる技術開発、設計・計画検討に取り組んできた。

富士電機の廃止措置技術については、1997年に本誌にて既に報告しているが<sup>1)</sup>、本稿はその後得られた実績や成果を織り込んで報告するものである。

廃止措置の計画段階においては、解体撤去対象物の物量、性状、放射性物質濃度など様々な情報源に基づき、安全かつ合理的な計画を策定する必要がある。富士電機は、最適な計画策定の支援、合理的なコスト・工程等の評価に資するシステムエンジニアリングの強化を行った。その一環として原子炉デコミッション管理のための計算コードCOSMARD<sup>2)</sup>に係わる開発、適用性評価について日本原子力研究所殿と共同研究を進めてきた。また、原子力研究バックエンド推進センター殿の委託により解体廃棄物の処理・処分コスト等を評価するシステムの開発にも協力した。

廃止措置計画を具体化する段階では、対象とする原子炉施設の放射エネルギーの分布を精度よく把握しておく必要がある。解体物の放射性物質濃度により処分方法が異なり、各処分場で要求される廃棄物の要件を満足するような解体手順、廃棄物管理方法を予め考慮しておく必要があるからである。富士電機は、東海発電所における原子炉内の中性子束分布の解析から放射エネルギーの計算、計算結果を裏付けるための実測結果との比較分析評価などの技術分野に関し豊富な経験を有している。

原子炉など高線量領域の解体には遠隔操作で実施することになるが、富士電機では、これまで、NUPECの原子炉遠隔解体に係わる確証試験（以後、「NUPEC確証試験」と呼ぶ。）の経験をはじめ、東海発電所の原子炉内の試料採集を行なうための遠隔装置等の提供、核燃料サイクル施設における遠隔搬送設備の納入実績等、豊富な経験とノウハウを有している。

一方、廃棄物処理処分については、NUPEC確証試験による解体廃棄物の特殊な処理技術、民間基準整備に向けた対応、社内で開発した減圧酸素

プロセス処理による廃樹脂減容技術などの多様な技術を保有している。

本稿で紹介する富士電機の技術項目は以下のとおりである。

- ・遠隔解体技術：解体装置の設計・確証試験、切断減容技術、3D形状認識応用技術、炉内試料採取装置
- ・廃棄物処理処分：黒鉛・金属ドロス充填確証試験、圧縮等廃棄物量低減対策、廃樹脂減容装置開発
- ・放射能評価技術：廃棄体核種濃度評価

## 2. 遠隔解体技術

### 2.1 遠隔解体装置

富士電機では原子炉を安全・確実かつ効率的に解体する方法・手順を検討するとともに、遠隔解体装置の設計・開発を実施している。<sup>3) 4)</sup> 商業用原子力発電所の原子炉構造の一例 (GCR型) を Fig.1 に示す。原子炉は直径18mの大型球形構造で、内部には重量物である炉内鋼構造物、約3万個の黒鉛ブロック、積層構造物 (ボロンシールド等)、複雑に組み合わせた構造物 (チャージポット等) など、様々な構造物で構成されている。

これらを解体対象物として取り扱う原子炉遠隔解体装置には、広範なエリアに到達できる機能及

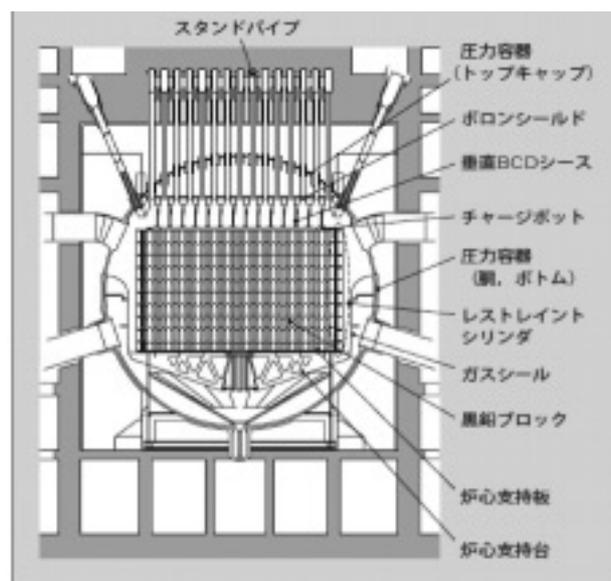


Fig.1 Example of the nuclear reactor structure

び対象物別に適合した把持機能を持つ把持機が要求される。さらに、解体工事を効率的に進めるためできるだけ装置の種類を少なくし、対象物ごとの据付替えに要する時間を削減することが要求される。

原子炉遠隔解体装置の技術開発に当たっては、把持機に機構的な融通性を持たせて位置決め能力や運転制御の高度化を避ける方式とし、さらに単純な動作で原子炉構造の全域に到達できるアーム機構とからなる解体試験装置を実尺で製作し機能確認を行った。さらに、不定形な切断線に適応した切断タッチ用マニピュレータの試作開発も並行して行った。

(1) 原子炉遠隔解体装置の設計

原子炉遠隔解体装置の概要を Fig.2 に示す。原子炉は全方位を生体遮へい壁に囲まれており、原子炉遠隔解体装置がアクセスする上方向だけに穴を開け、その開口部に回転プラグを設置して解体期間中のバリアを形成する。原子炉遠隔解体装置は回転プラグの上に搭載され、アーム、把持機、切断機、昇降装置、ガイドレールから構成される。

構成は、Fig.2 に示したとおり極力シンプル化を図り、自由度はアームが屈折3、アーム先端部が回転1、昇降が1、マストが回転1の全6自由

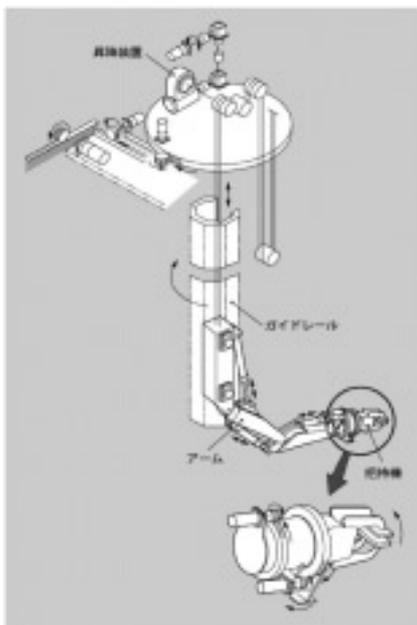


Fig.2 Driving principle of dismantling machine

度であり、これで全解体工程をカバーする。

各部位の設計内容を以下に示す。

(a) アーム

アームは構造の複雑化をさけるため、リンク数はバリア内での動作に最低限必要な2リンクにとどめ、駆動方式は一般産業界で実績豊富な油圧駆動方式とした。

アーム単体の動作は一平面内での屈折による前進、後退のみのシンプルなものとし、横方向の動作はガイドレールの旋回、上下方向動作は昇降装置によるものとした。

(b) 把持機

把持機の代表例には Fig.3 に示す鋼材用と黒鉛ブロック用の2種類がある。

①鋼材把持機

把持方式は2指外つかみ式とし、はさみ付ける把持動作中は把持対象物の位置や方位にならって指や手首部分が動き、把持動作が完了した時点でこれらをリジッドにする機構を取り入れた。これにより、位置ずれに起因する把持動作時の反力がアームに作用することはなく、作業の安全性が高まる。

②黒鉛ブロック把持機

黒鉛ブロックは、つかむための構造は無く、中央部に燃料棒を挿入している中央孔があるので、この孔を利用して摩擦力でつかみ上げる方式を採用した。

中央孔の寸法は、直径が約90~150mmの範囲で多種類あるため、把持するための爪は全寸法範囲

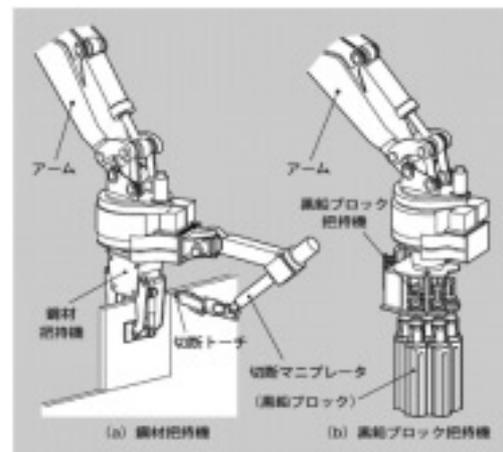


Fig.3 Handling and cutting tools

を無段階で開閉するストロークを持ちつつ、摩擦による把持に必要な押し広げ力を発生させる機構を考案した。

(c) 切断機

切断機は、プラズマアーク、パウダーガス、YAGレーザーなどの切断トーチを小型マニピュレータの先端に付け替えて動作させる方式である。

把持機用アームとの干渉を避けるため、マニピュレータは把持機用アームの先端（手首部分）部分に取り付け、把持状態からそこを基準とした動作方式にする設計とする。

(d) ガイドレール

アームの昇降を案内するガイドレールは、断面形状をコの字型とし、アームはその内側で支える構造とした。アームを真下に垂らした状態にすれば、ガイドレールの内側に入り込んで昇降ができるので、通常運転時にメンテナンスが必要になったり、先端に取り付けた把持機の種類を替えたりするときには、大きな段取り替えをすることなく作業を実行できる。

(2) 運転制御

原子炉遠隔解体装置据付時のずれや解体工事進捗よくに伴う計画位置からのずれを吸収するため、自動運転と手動運転とを効果的に組み合わせる運転方式を採用した。運転フローをFig.4に示す。

障害物回避に神経を使う大きな移動の範囲では、構造物設計データに基づく自動運転とし、最終位置決めの際は手動運転とした。高精度な位

置決めを必要としないずれ吸収機能付き把持機の特徴をいかし、オペレータによる比較的ラフな位置決め操作で目的物を確実に把持する方式を採用した。

手動運転モードのときの位置決め操作は、アーム両脇のITVカメラと把持機に組み込んだ小型カメラの映像を確認し、アーム先端の把持機をどこに移動させるかだけを指示するだけで、オペレータが理解しやすい直線的動作をするよう複数のアームの屈折角や昇降装置の動作量の最適な組合せを自動的に選ぶようプログラミングした。

(3) 原子炉遠隔解体装置の技術確認試験

NUPEC殿からの委託により実スケールの模擬試験体を使用しての実規模モデルによる技術確認を行った。

実スケール部分模擬試験体と組み合わせた状態の解体試験装置をFig.5に示す。実スケール部分模擬試験体を囲む試験架台の上に支持架台を設置し、試験用の原子炉遠隔解体装置を据え付けた。

解体試験装置は工法・手順、把持機・切断機の連携動作、動作範囲・自由度、周囲構造物との関係などに関する確認項目を試験するのに必要な機能を備えたものとした。

試験では実機同様に試験体の全てを解体するため、アーム先端に各種把持機を解体対象物に応じて簡単に付け替えられるよう着脱機構を備えた。

運転操作盤は、実機で計画している自動運転機能とITVカメラ映像確認によるジョイスティック手動運転操作機能をもたせて、オペレータの人

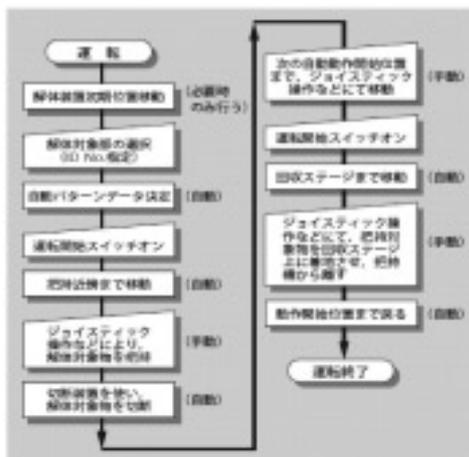


Fig.4 Procedure of the operation



Fig.5 Mock-up and proof examination facilities

的負担を軽減することの効果も確認できるようにした。

解体試験体を対象に解体装置による接近、把持・切断、持上げ、移送、搬出など一連の動作を行い、各部位に適した解体手順、運転操作・制御であること、および解体試験装置が解体に要求される機能を十分持っていることを確認した (Fig.6 参照)。

### 3.2 切断減容装置

放射化機器を処分するために処分容器への収納サイズに切断、減容する必要性が生じる。切断工法は熱的切断、機械的切断それぞれ様々な工法があり、切断対象に応じて取捨選択される。日本原子力研究開発機構 物質・生命実験施設に納入した切断装置 (Fig.7 参照) は、二次生成物の発生量を極力減らすため、ハサミ方式の切断機とし、主に直径90 mm の多重配管を切断するものである。<sup>15)</sup>

本装置は Fig.8 に示すようにハサミ状の機械的切断装置で、切断しながら対象物を上下に送り出



Fig.6 Dismantling examination using the plasma arc cutting



Fig.7 Cutting facilities

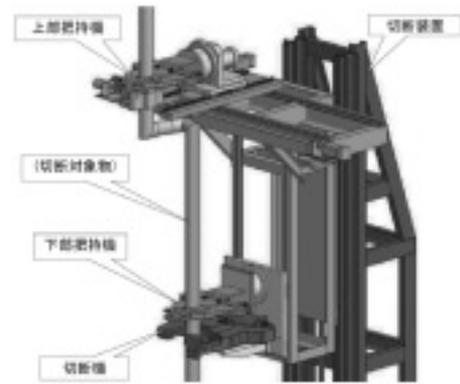


Fig.8 Handling and cutting mechanism

して切断位置を変えるために、切断機を2基の把持機と組み合わせて配置している。また装置全体を旋回動作させる機能を持ち、これら把持・切断機の向きを変え、切断対象の受け渡しを行う。

切断するハサミは、Fig.9 に示すように外側から抱え込むように内側に絞って切り込んでいく動作方式であり、切断対象物がハサミの外に逃げないようにした。取り扱う切断対象物の太さは64 mm から100 mm の広い範囲を対象としているので、把持する機構も切断ハサミと同様に内側に絞って挟み込む方式として、形状・寸法に関係なく内側の所定の位置で固定できるようにした

### 3.3 遠隔操作補助システム

原子力分野の放射線環境におけるハンドリング作業では、人が作業環境に立ち入ることができないため遠隔ハンドリング機器を使用する。

形状認識技術を応用してハンドリング対象 (ターゲット) の位置、姿勢を特定してバーチャル化する遠隔操作補助システムを開発した。<sup>5)</sup> オペ

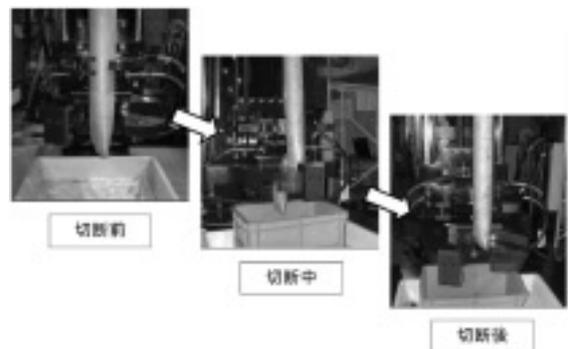


Fig.9 examination for cutting performance

レータはバーチャル画面を見たい方向に合わせることによって、マニピュレータなどの遠隔ハンドリング機器を容易に操作できるようになる。

(1) 遠隔ハンドリング補助システムのご概念

遠隔ハンドリング補助システムのご概念を Fig.10 に示す。本システムはターゲットの位置、姿勢を遠隔操作時に見る操作画面に表示し、マニピュレータのマニュアル操作に必須の画像、距離情報を提供するものである。操作画面にはカメラの実映像の他に作業環境（シーン）をバーチャルに表現した監視画像を表示する。シーンは作業環境に設置する距離センサーでターゲットを含む領域をスキャンすることによって点群データとして得られ、以下の特徴を持っている。

- ① シーンは3次元情報（空間の3次元座標）を持った点群で表現される。
- ② シーンの中にあるターゲットの輪郭及びマニピュレータの外形をコンピュータグラフィックス（CG）で表現する。
- ③ シーンを見る視線は任意に移動させることができる。
- ④ マニピュレータ先端とターゲット等、距離を知りたい任意の2点間を監視画面上でポイントングすることにより、その距離を得ることができる。

オペレータは、現場に設置するカメラの実映像と、上記の監視画面の両方が表示された監視・操作画面を見てマニピュレータ等の遠隔操作機器を操作する。操作画面のイメージを Fig.11 に示す。

(2) 三次元形状認識、CG表現の事例紹介

Fig.12は、実験対象とした複数の積木を、カメ

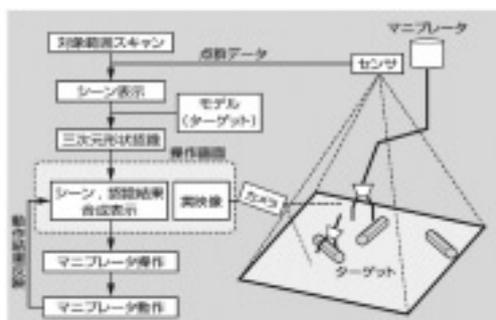


Fig.10 Remote handling assistance system



Fig.11 Image of monitoring, operation screen

ラ及び距離センサにて測定した図である。距離センサーによる測定図は、約30,000個点の点群により構成されており、このデータからターゲットとするモデルの形状認識を行う。認識すべきモデルの一例を Fig.13 に示す。モデルの底面サイズは55mm×110mmである。1個のモデルに対し約2,000点について3次元的な特徴量を計算しておく。

Fig.12に示したシーン30,000点の中から3次元的な特徴量の対応付けを行い、Fig.13に示したモデルの位置、向きを特定し、CG表現した結果を Fig.14 に示す。測定結果をCG表現することによる利点は以下の2点である。

- ① ターゲット全面の輪郭表示ができ、マウス操

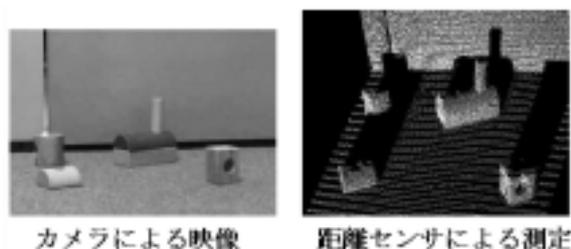


Fig.12 Measurement data

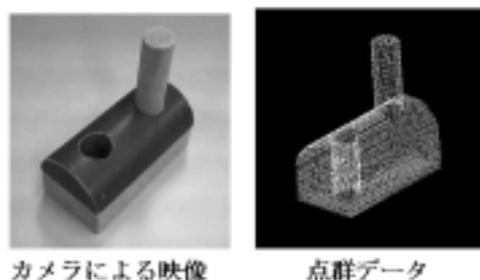


Fig.13 The point clouds data calculated by the 3D-Model of the target

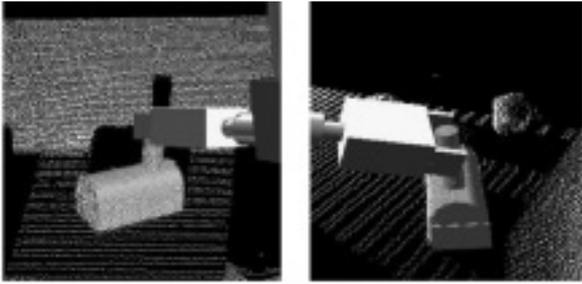


Fig.14 Example of C G

作によって任意の方向に視点移動が可能である。これにより実際には測定できない側面の映像を表現できるようになり、視覚的に的確な状況をつかむことができる。

- ②測定データと認識結果を3次元情報として保有しているの、任意の2点間を指定することにより、距離の算出が可能である。

本研究では、これまでに形状認識技術を中心に開発を行ってきて、シーンの中からターゲットを特定する段階にある。今後は、より現実的な作業環境を想定して簡易で、使いやすいヒューマンマシンインターフェイスとして発展させていく予定である。

### 3.4 炉内構造物試料採取装置

原子炉を解体して生じる廃棄物は放射化レベルに応じて分別処理し、廃棄物処分施設に保管される。原子炉本体の放射化レベルは、材質（成分割合）、運転履歴等に基づく放射化計算・評価により設定されている。放射化レベルは、解体方法、処理・処分方法を決定する重要な前提条件であるため、実態に合わせたクロスチェックが必要になる（Fig.15参照）。日本原子力発電(株)東海発電所殿において、原子炉本体の放射化計算・評価の精度向

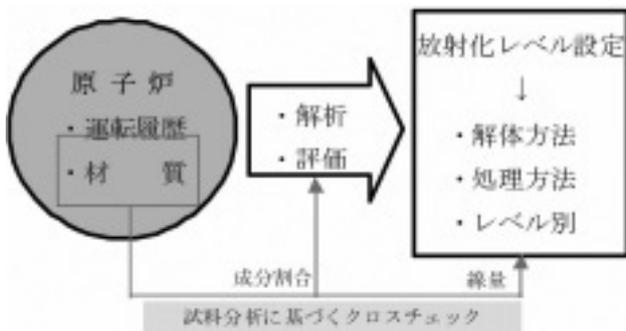


Fig.15 Radioactivation calculation, evaluation

上を目的に行われた炉内構造物からの試料採取作業向けに開発した試料採取装置をFig.16に示す。<sup>(14)</sup>

採取装置は炉内で切粉に加工する採取ツールと、作業員が立ち入り可能な運転フロアから原子炉内に採取ツールを吊り下ろす昇降装置・架台で構成される。試料は小型ディスクソー、ドリル、ホールソー等で採取対象の母材から切粉に加工した後、カプセルに吸引回収して炉外に取り出す（Fig.17参照）。

### 3. 廃棄物処理・処分

#### 3.1 解体廃棄物の処理概要

解体工事に伴い発生する解体廃棄物のうち放射性廃棄物はすべて低レベル廃棄物に分類される。

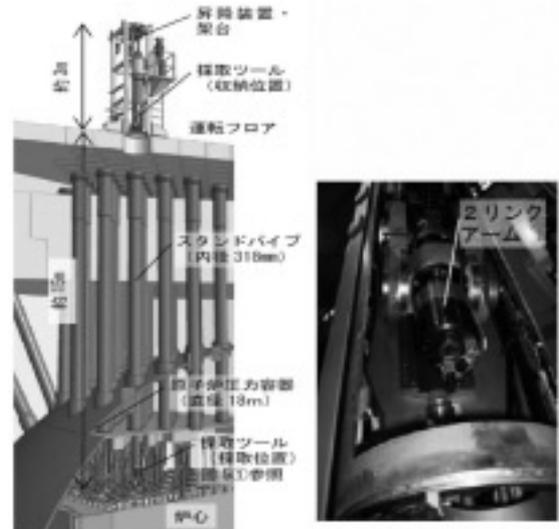


Fig.16 Sampling equipment for reactor internal structures

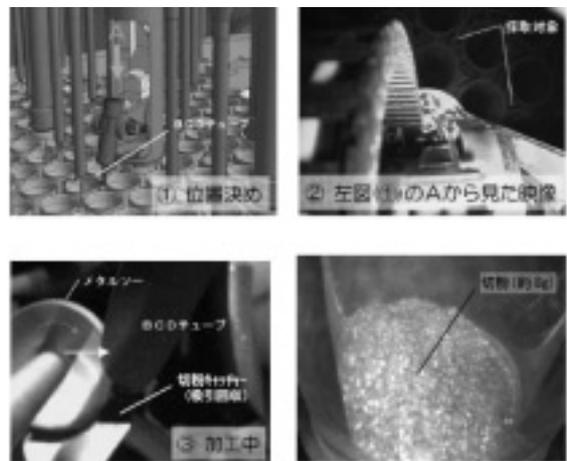


Fig.17 The sampling situation

低レベル廃棄物はさらに、廃棄物の放射能濃度に応じて放射能濃度が比較的高いもの(以後、「L1廃棄物」と呼ぶ)、放射能濃度が比較的低いもの(以後、「L2廃棄物」と呼ぶ)、放射能濃度が極めて低いもの(以後、「L3廃棄物」と呼ぶ)に分類される。

原子力発電所の廃止措置で発生する固体廃棄物は、110万kW級軽水炉1基当たり、約50万～55万トと推定され、そのうち、低レベル廃棄物は約0.6～1.2万トと推定されている。また、東海発電所の場合、廃止措置で発生する固体廃棄物約19万トのうち、低レベル廃棄物は約2.3万トと推定されている。

これらは、放射能濃度の区分や廃棄物の種類、形状等の特性を考慮して、合理的かつ安全に処理処分する必要がある。

解体工事で取出された解体物は適切な遮蔽機能を有する処分容器に収納し、モルタル充填など安定化処理を行ない、処分場が要求する廃棄物の要件を満足するための確認検査を行なった後、処分場に搬出される計画である。

解体工事では、解体環境や装置の制約等により、処分容器に収納できるサイズに切断できない場合や、異なる材質又は処分区分で構成される複合部材を合理的に分離できない場合が考えられる。この場合、二次切断や分離・分別等の中間処理が必要となるが、特に、処分場で受け入れられない有害物等が含まれる場合にはこれらを分離する処理は必須となる。

このほか、減容を目的とする圧縮処理、細断処理ならびに熔融処理、汚染レベルの低減を目的とする除染処理(解体後除染)も必要となる場合もある。この場合、新たな中間処理を追加することに伴う処理コストの増加と、従事者被ばく低減効果や廃棄物処分の経済性(容積低減)とのバランスを勘案し適切な処理プロセスを選択することが重要である。

富士電機では、これまで日本原子力発電(株)殿からの委託により東海発電所の解体物及びその処理に係わる調査・研究を推進してきたこと、また、NUPEC殿の解体廃棄物処理に係わる確認試験の実施、日本原子力研究開発機構殿の廃棄物処理設備の設計、核燃料サイクル施設等のマテハン設備の納入実績等により廃棄物処理に係わる経験とノウハウを蓄積している。

### 3.2 廃棄物処理技術

東海発電所の廃止措置に伴って、大量の低レベル放射性廃棄物が発生する。このうち、L1、L2の黒鉛及び金属廃棄物等は容器に充てんした廃棄体として処分されるが、処分費低減の観点からこれらの廃棄体の削減が重要となる。このため、富士電機はNUPEC確認試験や日本原子力発電殿の委託研究の中でこれらの廃棄体削減に向けた廃棄物処理技術の推進を図ってきた。

#### (1) NUPEC確認試験

##### ① 黒鉛高密度充てん技術

黒鉛高密度充てん技術は黒鉛ブロックを切断、破碎して可能な限り容器に高密度に充てん固化し、廃棄体数を低減するものである。本技術の確立に向け、黒鉛破砕片がその粒径によって固化性能に影響を及ぼすことから、先ず、模擬破砕片を用いて5.3ℓの小型容器による固化性能を確認した。その結果、粒径0～50mmの破砕片に振動を加えることにより良好な固化体が得られることが分かった。<sup>6)</sup>また、破砕片を容器に収納する際には、遠隔操作によって黒鉛ブロックが収納された容器の隙間に充てんする必要がある。このため、模擬破砕片を用いて遠隔充てん性能を確認した結果、**Fig.18**に示す良好な充てん性を確認した。<sup>7)</sup>

次に、**Fig.19**に示す部分容器モデルに実寸大の黒鉛ブロックを収納した状態で、振動を加えながら粒径0～50mmの黒鉛破砕片及びセメントペーストを注入させ、セメントペーストの先入量、破砕片の装荷量及び振動に関する最適条件を確認した。そ



Fig.18 Filling of crushed graphite into containers by remote handling

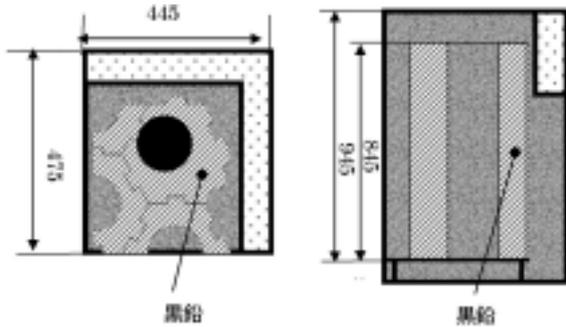


Fig.19 Partial model of graphite solidification substance

の結果、黒鉛の収納率は容器換算で約70%を達成するとともに、脱型後に外観、断面観察を行い、Fig.20に示す良好な固化体が得られ、空隙率1%以下の廃棄体を製作できる見通しを確認した。<sup>6)、8)</sup>

② 金属ドロス充てん技術

金属ドロス充てんは、放射性金属の熱的切断に伴う二次廃棄物の金属ドロス（粒径0～200mm）を金属廃棄物が収納された容器の隙間へ充てんする方法で、廃棄体数を低減するものである。NUPEC確証試験では、Fig.21に示すようなGCRの炉内構造物のリフレクタープレートを模擬廃棄物を対象とした充てん固化試験の結果、粒径10～200mmの金属ドロスは、前挿入による充てん固化

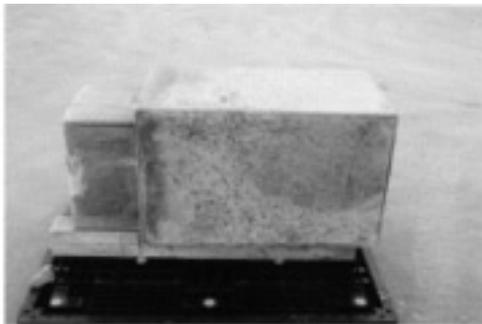


Fig.20 Densely-packed graphite solidification substance

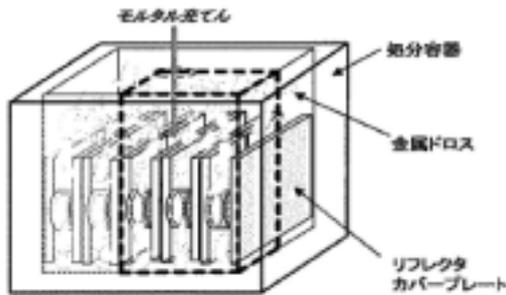


Fig.21 Model of metal dross solidification substance

が可能であることを確認した。

一方、固化が難しい粒径10mm以下の金属ドロスについては、これを細骨材として利用するための小型容器によるドロスマルタル充てん試験の結果、良好な充てん性が得られる配合条件を確認した。<sup>9)</sup>

(2) 廃棄物の減容（圧縮等）

東海発電所の廃止措置で発生する原子炉内構造物のうち、円管又は円環状の金属構造物等は圧縮による減容効果が期待できることから、実機を模擬した試験体を製作し、1000トンプレスによる金属圧縮試験を行った。Fig.22は燃料チャンネルポットを模擬した試験体（外径216mm×肉厚12.7mm×長さ200mm）を用いて径方向に圧縮した試験結果の一例を示したものである。

プレス出力約400トンで圧縮変形はほぼ平衡に達し、さらに、プレス出力約950トンの圧縮終了時に減容比3.7～3.8が得られることを確認した。本成果は、日本原子力発電(株)殿からの委託調査研究によるものである。

廃止措置の経済性向上、環境負荷低減の観点から廃棄体数量を合理的に低減することは重要な技術課題である。富士電機では、解体工事工程との整合性、廃棄体製作要件、経済性及び技術的成立性を踏まえ、解体撤去物の最適な収納組合せ、最適な減容方策等を考慮し、廃棄体数を合理的に低減する方策について検討を行っている。

(3) 民間基準整備に向けた対応

L1、L2の黒鉛及び金属廃棄物等は第二種廃

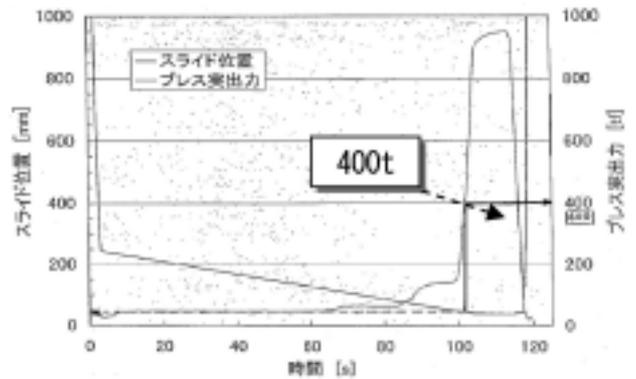


Fig.22 Experimental compression curve

棄物処理規則第8条第2項に定められる技術上の基準に基づいて、容器に封入または固型化した廃棄体として製作される。これらの廃棄体の製作方法については、日本原子力学会において民間基準（日本原子力学会標準）として整備が進められている。富士電機はこれらの民間基準整備に際して実施された電力共通研究等に参画し、推進を図ってきた。

### 3.4 廃樹脂減容装置の開発状況

原子力発電所の運転に伴い、施設の水処理システムからは放射性廃棄物である使用済イオン交換樹脂（以下廃樹脂と称す）が発生する。これら廃樹脂は、浄化するシステムによって放射性物質濃度が異なり、放射性物質濃度が比較的高い廃樹脂は原子力発電所の敷地内に貯蔵され、放射能レベルが減衰した後処分される計画であるが、その貯蔵量は年々増加を続けている。

廃樹脂は、今後、規定の金属容器内にセメント等で固化した「廃棄体」として地中に埋設処分される計画である。廃樹脂の「廃棄体」は、長期健全性を確保する観点から、廃樹脂の安定化処理を行った後に固化することが必要になるといわれている。また、放射能濃度の高い廃樹脂は処分費が高価であるため、コスト低減の観点から処分量を減らすことが要求される。これらの要求を実現するためには、廃樹脂の減容と安定化の両方を同時に満足できる処理技術が必要となっている。富士電機では、このような要求に応える技術として減圧酸素プロセス（Low pressure Oxygen Process）とその装置の開発を続けている。LPOP処理は、低レベル放射性廃棄物である廃樹脂の減容処理と安定化処理が同時に実現可能な技術である。

減圧酸素プロセス処理とは、数kPaの減圧酸素雰囲気中で生成する低温酸素プラズマの活性とヒータ加熱を組合せることによって、難燃物に対して制御された燃焼と酸化分解の処理を行う方法である。供給ガスは酸素だけなので排ガスが少なく、減圧下で処理を行うため高い反応効率が期待できるといふ特徴がある。Fig.23にLPOP装置の概念を示す。

また、LPOP技術を搭載した実規模試験装置の外観をFig.24に示す。実規模試験装置は、口径約

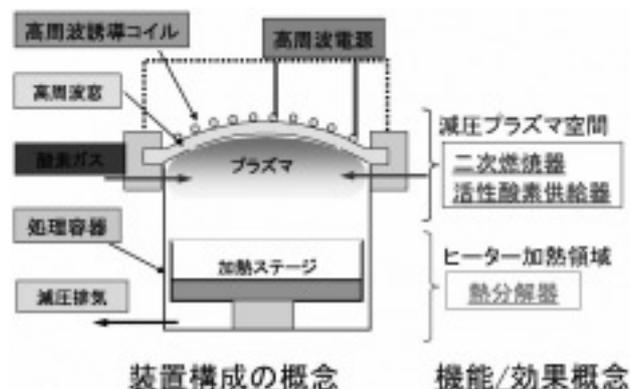


Fig.23 Conceptual Diagram of the LPOP system



Fig.24 Exterior View of Fuji Resin Reducer

800mm、高さ約1000mmの減圧処理容器をそなえており、直径約 $\phi$ 650mmの樹脂を加熱するためのステージを内包し、20dry-L/日の処理能力を持つ。また、処理容器を減圧する真空ポンプと酸素ガス供給系が接続される。処理容器上部には、プラズマ生成のための高周波電源が接続された誘導コイルが石英製窓を介して大気圧側に設置されている。

これまでに、実廃樹脂の持つ主要成分を非放射性成分で模擬したイオン交換樹脂を使った処理試験や管理区域に持ち込めるようスケールダウンした小型試験装置による実廃樹脂処理試験<sup>10)、11)</sup>、処理後の灰化樹脂のセメント固化試験<sup>12)</sup>や灰化樹脂中の成分調査<sup>13)</sup>による埋設処分に向けたLPOP処理の適用性評価を行い、以下の結果を得ている。

- ① LPOP処理によって、有機樹脂であったイオン交換樹脂は1/20以上に減容されるとともに、炭素や水素、イオン交換基成分の窒素や硫黄成分が分解排出されて無機化した「灰化樹脂」となる。
- ② イオン交換樹脂に吸着されていたイオンは、「灰化樹脂」においては、遷移金属イオンは酸化物となり(90%以上)アルカリ金属は硫酸塩となる(70~95%)。
- ③ 「灰化樹脂」はセメントと容易に混合し、硬化する。系統成分を模擬した「灰化樹脂」の混合率を30wt %以上としてセメント固化しても固化体の一軸圧縮強度は告示の規定を満足できることを確認している。<sup>13)</sup>

上述の評価結果等から、LPOP処理は埋設処分に向けた減容と安定化の両方を満足できる処理として有効な技術であると考えている。

LPOP技術を搭載した処理装置FRR (Fuji Resin Reducer) は、耐火物が無く小型コンパクトな装置なので、処理容量や設置場所に合わせたフレキシブルな設備供給ができる。現在我々は、本装置の小型である特長を活かした移送、設置性に優れた「トランスポートابل」なシステムの開発を進めている。トランスポートابلシステムユニットの例をFig.25に示す。

富士電機では、LPOP技術とこの技術を活かしたFRRの開発を続けている。LPOP処理は、低レベル放射性廃棄物である廃樹脂の減容処理と安定化処理が同時に実現できる技術である。また、その装置は、耐火物が無く、小型コンパクトな装置なので、処理容量や設置場所に合わせたフレキシブ

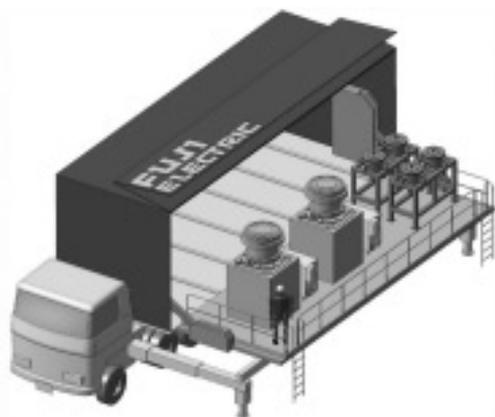


Fig.25 Example of Transportable unit

ルな設備供給ができる。富士電機では、今後の、高線量廃樹脂処理への適用に期待できると考えている。

#### 4. 放射能評価技術

解体工事に伴い発生する解体廃棄物は、事前にその放射能濃度が評価され、廃棄体として申請後、認可を受ける必要がある。現在、この廃棄体の放射能評価方法のガイドラインが日本原子力学会の標準の一環としてまとまりつつある。

富士電機は、東海発電所の運転停止前から原電殿への技術協力の一環として原子炉まわりの放射能濃度分布や照射中性子フルエンス率の測定等を実施するとともに、放射化計算手法の確立のための検討を行ってきた。

日本原子力学会の標準策定に際しても、分科会に参画し、東海発電所特有の黒鉛部材の放射化放射能を評価するための手法を提案している。併せて、炉内に残存している制御棒等の運転中廃棄物をはじめ炉内構造物の放射能評価を実施している。

本稿では、東海発電所に特徴的な廃棄物である黒鉛減速材や黒鉛反射材の放射能評価手法を紹介する。

埋設する廃棄体中の放射性核種濃度の決定方法としては、6種類の方法が原子力安全委員会において示されている。

- ・非破壊外部測定方法
- ・スケーリングファクタ法
- ・平均放射能濃度法
- ・理論計算法
- ・廃棄体破壊分析法
- ・原廃棄物分析法

これらのうち、余裕深度処分対象の廃棄体については、放射化による放射能が主であることから、非破壊外部測定による精度が低くなることから、放射化計算による理論計算法による計算で評価できるものとされている。理論計算法のうち、親元素組成、中性子フルエンス率、照射履歴等の計算パラメータの変化により得られる複数の計算結果の統計処理により平均、最大を求める方法(「複数の計算結果から計算する方法」)として黒鉛減速材を

対象として計算した結果を示している。

Fig.26に放射化計算の流れを示す。

黒鉛減速材の計算結果として、主要な親元素である窒素 (N) の微量分析結果からNの組成のばらつきから求められるC-14濃度の複数の計算の例を Fig.27に示す。

Fig.27の計算結果では中性子フルエンス率は炉内の最大値を、照射履歴は東海発電所の試運転からの運転履歴を用いた。

次に、Fig.28に実測されたC-14の放射能濃度と計算結果との比較を示す。



Fig.26 Flow of Activation Calculation

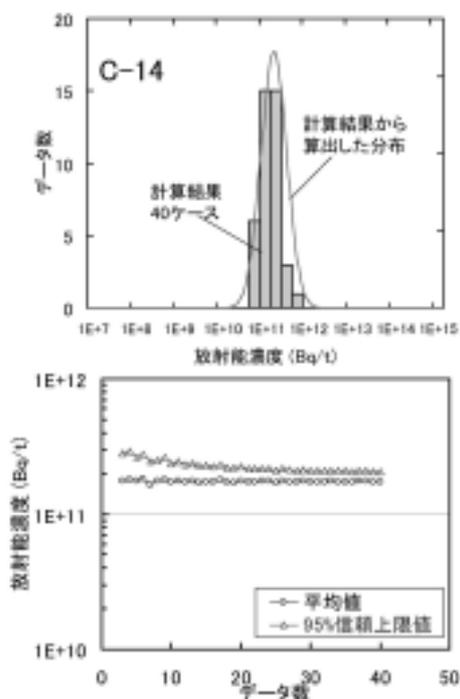


Fig.27 Example of C-14 Calculation Activity

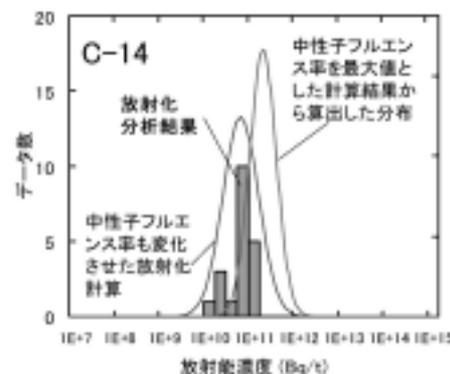


Fig.28 C-14 Calculation / Analytical Activity

Fig.28より、放射化分析結果に基づく実測結果では、炉内の中性子フルエンス率の相違も考慮した結果となっており、理論計算法によりそのばらつきをよく再現していることがわかる。

以上のように、富士電機では、解体廃棄物の廃棄体申請に向けた放射能評価手法の検討を実施するとともに、評価精度を向上するための評価方法の改善・改良を実施していく計画である。

## 5. おわりに

以上述べてきたように、当社は関係各位のご指導を頂きながら原子炉施設に必要な各技術分野について、技術開発ならびに関連する確証試験、設計研究等を行ってきた。また、これらの開発技術が実際の廃止措置現場で活用されているものもある。

当社は東海発電所の原子炉本体解体を中心とする本格廃止措置工事（第3期工事<sup>14</sup>）の計画から、解体、廃棄物処理・処分に至るまで全体を見据えた安全かつ合理的な計画策定、工事の効率的な進行、リスク低減に資する技術開発に取り組んでいく考えである。

## 謝 辞

ここに紹介しました、弊社の技術開発は、日本原子力発電(株)殿、旧原子力発電技術機構殿、日本原子力研究開発機構殿はじめ多くの機関のご指導、ご協力のもとで実施いたしました。関係者の皆様方には深く感謝いたします。

最後になりましたが、この度の東日本大震災に

より被災されました方々には心よりお見舞い申し上げますとともに、一刻も早い復興と再生をお祈り申し上げます。

参考文献

- 1) 白川正広、高谷純一、水越清治 他、“原子炉廃止措置技術の開発状況 -富士電機の廃止措置技術-”、Journal of RANDEC No.16 (July 1997)
- 2) 柳原敏、助川武則、田辺憲男、高谷純一“Systems engineering approach to planning of nuclear power plant decommissioning; Application of JPDR dismantling data to Tokai Power Station Decommissioning” Proc. of SPECTRUM' 98, p.269-274(1998); (JAERI-J 16826)
- 3) 白川、児玉、“原子力施設の廃止措置技術”、富士時報、76 [6]、353-358 (2003)
- 4) 富塚、小栗、井上、他、“商業用原子炉発電所の遠隔解体確認(その22) 試験”、日本原子力学会「2004春の大会」予稿集、IV-411、(2004)
- 5) 富塚、高橋、神坐、“遠隔ハンドリング補助システム”、富士時報、81 [5]、347-351 (2008)
- 6) 水越清治、大橋一孝、白川正広、小栗第一郎、井上隆、“解体廃棄物処理システム技術確認試験 黒鉛廃棄物処理技術開発(その5)、高密充てん試験・火災・爆発条件確認試験(その2)” 日本原子力学会「2001秋の大会」予稿集 (2001)
- 7) 平成14年度“実用発電用原子炉廃炉設備技術確認試験 原子炉遠隔解体システム技術確認試験 解体物充てん収納技術(金属ドロス、黒鉛充てん法)黒鉛廃物充てん固型化”報告書(2002)
- 8) 白川正広、遠藤茂樹、村上知行、新堀邦明、佐藤龍明、小栗第一郎、井上隆、“解体廃棄物処理システム技術確認試験 黒鉛廃棄物処理技術開発(その8) 高密充てん試験確認試験(その3)” 日本原子力学会「2002秋の大会」予稿集 (2002)
- 9) 水越清治、“21世紀の原子力発電所廃止措置の技術動向、第6回 廃止措置技術-処理処分動向” 日本原子力学会誌、Vol.52、No.2 (2010)
- 10) 佐野一哉、東浦則和、川越慎司、片桐源一、他、“減圧酸素プラズマによるふげん廃樹脂の処理試験(1)(2)” 日本原子力学会2002年秋の大会予稿集 第三分冊 p601、p602
- 11) G. Katagiri, M. Fujisawa, T. Shimamura, FujiElectric Co.,Ltd.;K.Sano, N. Higashiura, JNC “SPENT RESIN TREATMENT TEST IN THE ATR FUGEN NUCLEAR POWER STATION USING LOW PRESSURE OXYGEN ICP” Proceeding of ICEM' 03 -4869
- 12) 片桐源一、清水明夫、富内芳昌、虎口信、“ICプラズマ減容残さのセメント固化試験” 日本原子力学会2001年 秋の大会予稿集 第3分冊 p783
- 13) 清水明夫 他、“ICプラズマ減容処理による樹脂吸着イオンの安定化” 日本原子力学会2002年 春の年会要旨集 第3分冊 p588
- 14) 荻込敏、山内豊明、“東海発電所の廃止措置の計画と現状” Journal of RANDEC No. 43 (Mar. 2011)
- 15) 児玉、“J-PARC物質・生命科学実験施設向け機器の完成”、富士時報、81 [5]、352-356 (2008)

## 廃止措置に適用する測定・除染・解体技術

廣川 勝規\*、久田 雅樹\*、福井 康太\*、井上 設生\*

### *Measurement, Decontamination and Dismantlement Technology that applies to Decommissioning*

Katsunori HIROKAWA\*, Masaki HISADA\*, Yasutaka FUKUI\* and Setsunari INOUE\*

日本原子力研究開発機構では、事業の合理化及び効率化を図るため、使命を終えた施設、経年化が進んだ施設については、計画的に廃止措置を進めることとしている。廃止措置は、施設の種類や解体対象物の特徴を考慮し、測定・除染・解体技術を上手く適用し、安全かつ経済的に実施する必要がある。本報告では原子力機構 大洗研究開発センター 環境保全部 環境技術課で開発した測定・除染・解体技術について紹介する。

In Japan Atomic Energy Agency, Facilities where the mission was finished and superannuation facilities are decommissioned systematically for rationalization and efficiency improvement of business. It is necessary to execute safe and economically by making good use of the technology according to the kind of facilities and the feature of the dismantlement object.

In this report, it reports on the radiation measurement, decontamination and dismantling technology that develops in the Waste Treatment Technology Section O-ARAI Research and Development Center JAEA.

#### 1. はじめに

日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構という）では、事業の合理化及び効率化を図るため、使命を終えた施設、経年化が進んだ施設については、計画的に廃止措置を進めることとしている。廃止措置の実施に際しては、測定・除染・解体技術を組み合わせ、十分な実施計画を練り、解体工法、費用、工期、作業被ばく、廃棄物発生量等を評価する必要がある<sup>1)</sup>。この評価に際しては、廃止措置の対象施設によって、解体・撤去対象物の

表面線量率、汚染形態、材質、寸法などが異なることから、個々のケース毎に最適な手順、方法、作業管理を幅広く検討する必要がある。特に除染・解体時における作業者の内部及び外部被ばく対策、包蔵性の管理、二次廃棄物の低減化対策は重要となる。

原子力機構 大洗研究開発センター 環境保全部 環境技術課（以下、環境技術課という）においては、1986年頃（当時、動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター 環境技術課）から廃止措置に適用する測定・除染・解体技術の開発に取

\*：(独)日本原子力研究開発機構 大洗研究開発センター 環境保全部 環境技術課  
(Waste Treatment Technology Section, Waste Management Department O-ARAI Research and Development Center, Japan Atomic Energy Agency (JAEA))

り組んできた。本報告においては、これまでに環境技術課において開発した技術について紹介する。

## 2. 測定技術

廃止措置における測定技術は、解体作業の計画時、解体物の区分時に必要となる。

解体作業の計画策定にあたっては、作業者の放射線防護を図るため、解体対象物中の表面線量率、放射能インベントリ及び放射能分布を定量的に推定することが重要となる。また放射性廃棄物の発生量の低減を図り、廃止措置に係る費用低減を図るため、クリアランスレベル以下のものであるかどうかを区分するための測定技術も重要となる。

### 2.1 放射線の可視化

解体作業の計画段階においては、放射線測定に係る作業被ばくを軽減するため、解体対象物に対して遠隔から迅速に線源位置（汚染密度が高いポイント）を特定し、かつ可視化する技術が必要であり、このための測定装置として「放射線映像化装置 (RID)」を開発した。

RIDは、1986年に200keV以上のエネルギーの $\gamma$ 線を対象とした1号機を開発して以来、 $^{241}\text{Am}$ 等の低エネルギー核種を対象とした2号機、セル内の汚染分布を測定する3号機を開発した。

#### (1) 測定原理と機器構成

RIDの測定原理は、指向性を持つ $\gamma$ 線検出器及び距離計を測定対象物に対して走査し、得られた放射線計測情報（計数率）及び距離情報から1,500～9,000画素で構成される放射線分布画像を10段階に色分けし、それをCCDカメラで撮影したTV画面上で合成し映像化するものである<sup>2)</sup>。3号機を例に機器の構成を説明すると、Fig.1及びFig.2に示すとおりRIDは、 $\gamma$ 線検出器(CsI(Tl)+PD)、CCD及びこれらの駆動装置等からなる検出部本体、放射線情報等のデータを処理するパーソナルコンピュータ並びに画像の合成・記録・プリントを行う映像関連機器からなるデータ処理部、検出器とデータ処理部の間に信号変換器、多重伝送ユニット及びインターフェイス等を組み込んだ中継ボックスの3種類のハードウェア及びデータ処理用ソフトウェアからなる。そして、セルの天井に

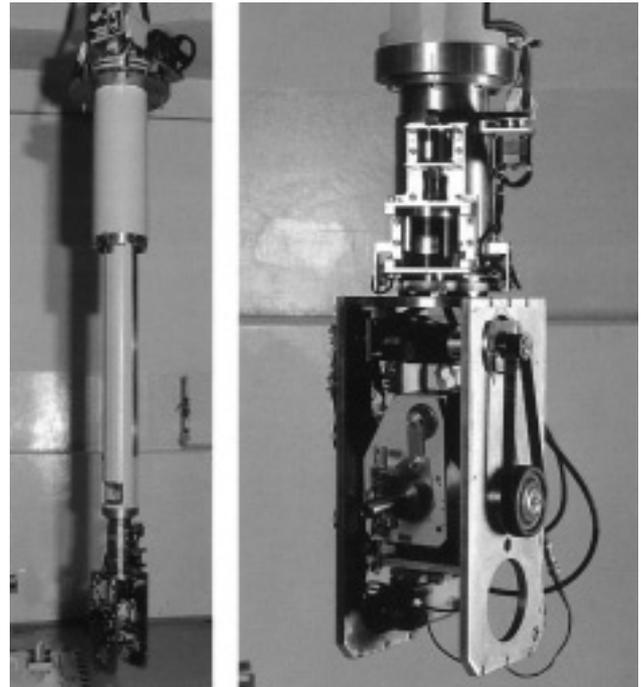


Fig.1 Detector of Radiation Image Display(RID) (type 3)

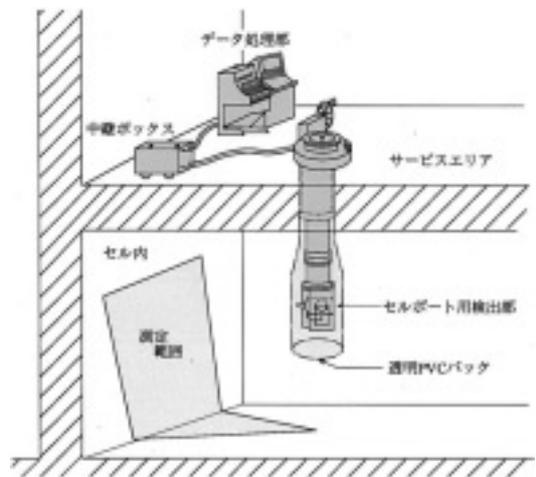


Fig.2 Setted up the RID (type 3) at Cell Port

設けられている搬出用ポートを利用し、検出部本体を吊り下げて、セル内の汚染分布を把握することができる<sup>3)</sup>。

#### (2) 装置性能

放射線計測に係る指向性を高めるため、RIDの検出部には、しゃへい厚さ4cmのタンゲステン製のコリメータが取り付けられている。しかし、 $\gamma$ 線による場の空間線量率がかなり高い場合には、コリメータの開口部から入射する $\gamma$ 線としゃへいを透過して入射した $\gamma$ 線とを分別することが

難しくなる。

これまでに実施したRIDによる測定では、Fig.3に示すように<sup>137</sup>Csを主要核種とする核燃料施設において、RIDの設置場所での空間線量率が数百 $\mu$ Sv/hで、測定対象物の表面線量率が数10 $\mu$ Sv/hという条件で線源位置を特定することができた。また、Fig.4に示すように<sup>60</sup>Co等を主要核種とする原子炉施設においては、RIDの設置場所での空間線量率が数mSv/hで、測定対象物の表面線量率が10mSv/h程度という条件で線源位置を特定することができた<sup>1)</sup>。

### (3) 現在の状況

現在RIDは新たな開発は実施していないが、廃止措置を実施する施設の環境に応じてコリメータ



Fig.3 Example of Measurement at Nuclear fuel facility

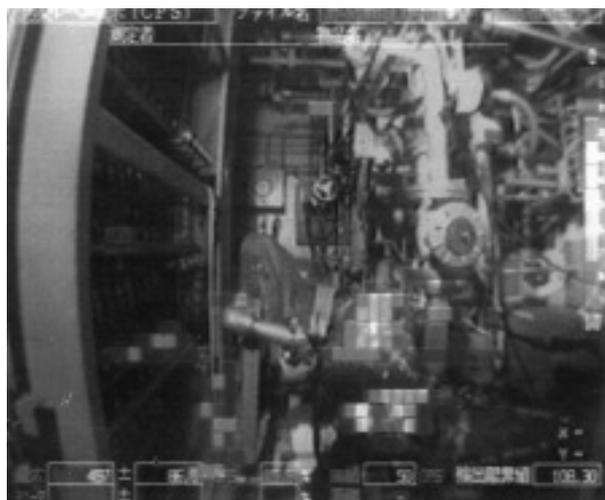


Fig.4 Example of Measurement at Nuclear reactor installation

のしゃへい厚さや形状を設計し、新規に製作することにより、廃止措置計画策定時に用いる測定装置として利用することが可能である。また、耐放射線CCDを採用することにより高線量下での測定も可能となる他、当時と比較しコンピュータの性能も格段に進歩しており、データ処理能力向上による測定時間の短縮も期待できる。

## 2.2 クリアランス測定

原子炉施設の廃止措置に伴い発生する解体物には、放射性廃棄物として取り扱う必要のないクリアランスレベル以下となるものが多く含まれ、これらを適切に区分・分類することにより放射性廃棄物の発生量を低減させ廃止措置全体におけるコストの低減を図ることができる。また、クリアランス対象物を適宜、管理区域から一般区域に搬出することにより、装置・機器の解体撤去に必要なスペースを確保するなど、作業の効率化が期待できる。

環境技術課においては、大洗研究開発センター内にある重水臨界実験装置（以下、DCAという。）の廃止措置における第3段階（原子炉本体の解体撤去）で発生する金属類約80tの測定に用いるため、2011年にクリアランス測定装置を製作した。Fig.5にクリアランス測定装置の外観を示す。

### (1) 装置概要

本装置は、 $\gamma$ 線測定により<sup>60</sup>Coの放射能濃度を測定・評価し、全放射能濃度に対する<sup>60</sup>Coの寄与

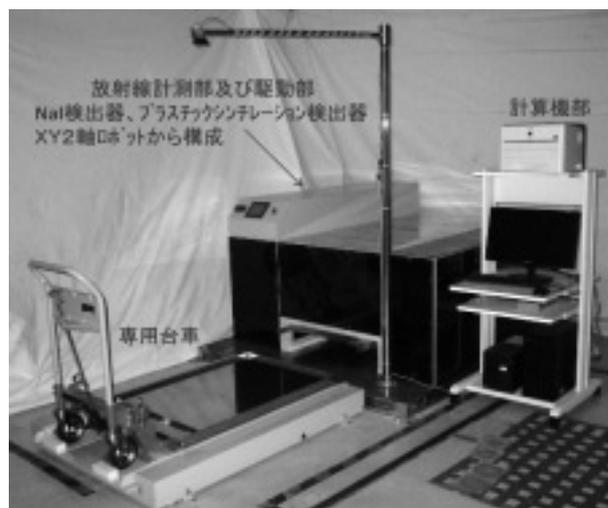


Fig.5 Clearance Level Measuring Instrument

率（本装置とは別に測定・評価した既知の値）から<sup>60</sup>Coを除く他の核種の放射能濃度の評価を行う。これにより得られた核種毎の放射能濃度(D)及び「放射能濃度についての確認等」に関する規則に定めるクリアランスレベル(C)の総和( $\Sigma D/C$ )が1以下となることを確認してクリアランスの可否を判定する。

また、測定対象物の表面密度を測定し、管理区域からの搬出基準を超えないことを確認し、搬出の可否の判定も行う。

### (2) 装置の構成

本装置は、専用台車を用いて手動にて測定対象物を放射線測定部に移動させ、測定終了後に台車を取り出す構造になっている。また、本装置は放射線計測部、駆動部及び計算機部から構成される。放射線計測部は $\gamma$ 線用の大型NaI検出器1台及び $\beta$ 線用のプラスチックシンチレーション検出器1台からなる。駆動部は前述した専用台車、NaI検出器をXY方向にスキャンする2軸ロボットからなり、専用台車に乗せられた測定対象物をXY軸それぞれ100mm毎に分割し、分割された100mm角のエリア（以下、セクタという）の中心に検出器（NaI及びプラスチックシンチレーション検出器）を移動させ測定を行う。セクタ数は70であり、セクタ毎にデータを収集する。計算機部は専用ソフトがインストールされたパーソナルコンピュータ、ディスプレイ、プリンタ及び駆動部用コントローラから構成され、測定結果をもとに評価・解析しクリアランスの可否及び管理区域からの搬出の可否を判定するとともに駆動部の制御を行う。

### (3) 装置の性能

本装置により1回に測定できる測定対象物の重量は100kg以下であり、寸法は幅700mm以下×奥行1,000mm以下×高さ5mm以下である。また1回の測定に要する時間は120分である。

現在、本測定装置は模擬測定対象物（材質及び形状を模擬した既知の線源を取り付けた試験片）を用いた性能確認試験を実施中であり、測定値と真の放射能値とを比較し、十分な安全裕度を有することを確認している。

## 3. 除染技術

除染技術は、表面にルーズに付着する汚染であるか、強固に固着する汚染であるか、母材表皮のごく薄い層に侵入した汚染であるかといった汚染形態に対応して適用することが重要である。また、解体・撤去に係る作業被ばくを低減するための除染であるのか、廃棄物の区分を変更させ処分に係る負担を軽減させるための除染であるのかによっても適用すべき技術は変わってくる。

しかし、いずれの場合においても、二次廃棄物の発生が少なく、その処理・処分が容易であり、かつ除染性能が高いものが求められる。

### 3.1 ドライアイスブラスト除染

大洗研究開発センター内にある固体廃棄物前処理施設（以下、WDFという）において、高線量固体廃棄物の除染設備として従来からドライアイスブラストを用いている。

#### (1) ドライアイスブラストの特徴

ドライアイスブラストは、ドライアイスのペレットをノズル先端から除染対象物に噴射し除染するものであり、噴射後のドライアイスが昇華することにより二次廃棄物の発生を極めて少なくできる特徴を有している<sup>2)</sup>。金属や砂等のブラストと比較すると除染性能は劣るものの、ドライアイスのペレットを噴射する空気の圧力を高めること、ドライアイスペレットをフィードする割合を高めることにより除染効果を高めることが期待できる。

#### (2) ドライアイスブラストによる除染

ブラスト除染全般の課題であるが、除去した汚染が周辺に飛散することから、それを上手く回収する方法についても検討する必要がある。そこでWDFでは、除染フードシステムを組み合わせたことを考案した。

除染フードシステムは、フード本体、ダストコレクタ、ブロアーで構成され、除染に伴い発生するダスト、ミスト及び剥離物を回収する。また除染効果を高めるため、噴射ノズルの角度は $\pm 15^\circ$ の範囲で可変することができ、廃棄物を乗せるターンテーブルを最大20rpmで回転させることができる。

除染フードシステムを組み合わせたドライアイスブラストの概略図をFig.6に、WDFのセル内に設置した除染フードシステムの写真をFig.7に示す。

本システムを用いた除染試験では、表面線量率が数mSv/h～160mSv/hの容器類、工具、マンプレータの手首等の単純形状や複雑形状の12体の実廃棄物を用い、圧縮空気の流量が6 m<sup>3</sup>/min、ドライアイスペレットの噴射量を5 kg/2.5minの条件で繰り返し噴射し、除染効果を確認した。その結果、容器や工具といった単純形状物7体については500 μSv/h未満(WDFにおいて低線量廃棄物に仕分ける基準)にすることができ、最大100のDFを得た。しかしマンプレータ手首等の残り5体の複雑形状物では5程度のDFしか得られなかった。また、剥離した汚染等については除染フードシステム外に飛散してなかったことを確認した<sup>4)</sup>。

### (3) 除染技術の応用

(2) の試験結果に示すように、ブラスト除染

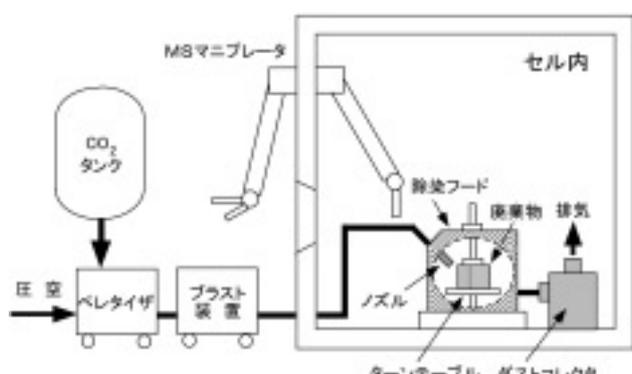


Fig.6 Decontamination Hood System and Dry Ice Blast



Fig.7 Decontamination Hood System in Cell

は、ブラスト材が入り込めない狭隘部分を有する複雑形状物には不向きであるが、除染対象面を露出させるような前処理を施すことができれば適用範囲の拡大が期待できる。

また、逆に施設内の床や壁等といった広い平滑面を除染することは得意であり、ドライアスを噴射してすぐに吸引回収するシステムを考案することにより、剥離した汚染物を飛散させることなくスピーディに除染することが可能となる<sup>5)</sup>。環境技術課においては、剥離物及びショットしたドライアスを飛散させず吸引回収することが可能な2種類(ワイドタイプ及びスポットタイプ)の吸引ドライアイスブラストノズルを開発した。

### 3.2 レーザ除染

物質表面にレーザー光を照射すると、表面物質を急速に加熱して、溶融又は蒸散させることができる。このため、レーザー光はセラミックやポリマーの微細加工、各種薄膜の生成、電子回路のリペアリング等に応用されている。このような急激な加熱による溶融又は蒸散作用は、金属表面の除染に適用することができる。



Fig.8 Suction Type Dry Ice Blast System

(1) レーザ除染の特徴

レーザー除染は、照射用のノズル（以下、ノズルという）から金属にレーザー光を照射することにより表面が加熱され溶融又は蒸散し、同一ノズルから噴射されるアシストガスの圧力により除去するものである。このため、媒体を使用しない乾式のプロセスであることから二次廃棄物の発生が極めて少なく、レーザー光は多関節ミラーやガラスファイバ等による伝送が可能であり遠隔操作性に優れる等の特徴を有している<sup>6)</sup>。

しかし、溶融又は蒸散されたものが再び表面に付着したり、溶融したものが除去しきれずに溶融堆積物として残り、汚染がこの溶融堆積物中に取り込まれ高い除染効果が期待できない等の課題があった。

(2) レーザ除染技術の開発

環境技術課においては（1）に示した課題を解決し、高い除染性能が得られるよう1994年頃から2002年頃に渡りレーザー除染技術の開発に取り組んだ。

開発に際しては、各種レーザー発振器（Co<sub>2</sub>レーザー（連続モード、ノーマルパルスモード）、Coレーザー（連続モード）、YAGレーザー（連続モード、ノーマルパルスモード、Qスイッチパルスモード）、KrFレーザー（短パルスモード））から金属表面の除去に最も適したレーザー発振器と発振モードを選定するとともに、溶融及び蒸散物の除去に最適なアシストガスの選定とノズル形状の設計を行った。

その結果、YAGレーザー（ノーマルパルスモード）を用い、アシストガスには不活性で比重が大きいアルゴンガスを用いることにより金属表面をより深く除去でき、かつ溶融及び蒸散物の再付着や溶融堆積物の残存を小さくできることを確認した。またFig.9に示すようにアシストガスのガス圧の中心がレーザー光の走査方向の後方となるようにノズルの中心軸とレーザーの光軸をわずかにずらすことにより、溶融堆積物が発生する方向を走査方向前方のみに生じさせることができ、溶融堆積物を残存させずに除染できることを確認した<sup>6)</sup>。

これらの知見を基に製作したノズルをFig.10に示す。

(3) レーザ除染の性能

実際の放射性廃棄物に対する除染性能を確認す

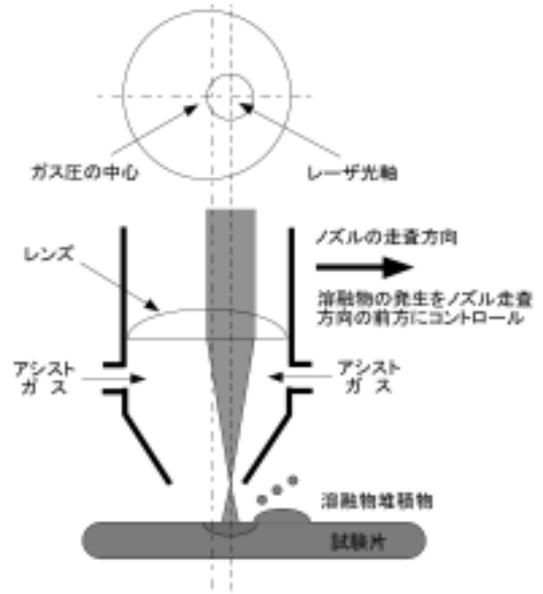


Fig.9 Structure of Laser Decontamination Nozzle



Fig.10 Laser Decontamination Nozzle

るため、腐食生成物(CP)が深層部まで浸透していると推測される主要核種が<sup>60</sup>Coの放射性廃液を移送する配管を試験片（表面密度が1～20kBq/cm<sup>2</sup>）に用いて、YAGレーザーの照射エネルギー密度を0.74kJ/cm<sup>2</sup>（レーザーのパルス速度60Hz、ノズルの移動速度60mm/sec、装置出力440W）の条件で除染試験を実施した。

除染試験の実施状況をFig.11に示す。

試験の結果、1つの試験片に対して2回レーザーを照射することにより、試験片の表面を0.15mm程度除去することができ、全ての試験片についてBGレベルにまで除染することができた。また、このとき最大2,100のDFを得た<sup>6)</sup>。

除去深さと計数率との関係をFig.12に示す。

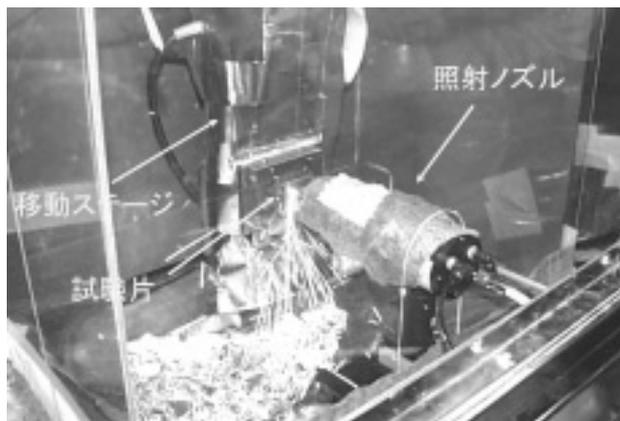


Fig.11 Situation of Laser Decontamination

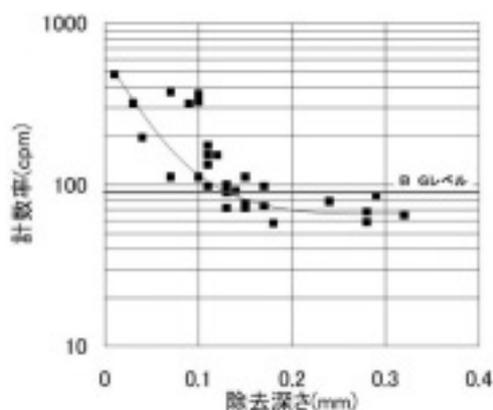


Fig.12 Performance of Laser Decontamination

#### (4) 除染技術の応用

除染試験に用いたYAGレーザーの発振器は、440Wのものであったが、現在では10kW級のものも開発されており、照射エネルギー密度を1.5kJ/cm<sup>2</sup>とした場合、レーザーのパルス速度を900Hzにまで向上でき、このとき除染速度を1m<sup>2</sup>/hまで向上させることが期待できる。

また、YAGレーザーは解体にも有用な技術であり、照射条件やノズルを交換することにより除染・解体の両方に利用することができ、廃止措置における解体撤去作業の合理化を図ることが期待できる<sup>6)</sup>。

#### 4. 解体技術

廃止措置における解体対象物の形状、寸法、材質等は多種多様であり、効率的に解体するためには、既存の切断技術等を応用することや、複数の技術を組み合わせること、また場合によっては新

しい技術を開発することが必要である。

解体撤去作業に適用する解体技術は、ガス切断やプラズマ切断等に代表される熱的切断技術とせん断や切削等の機械的切断技術に大別される。これらは主に金属を対象とした切断技術であるが、廃止措置への適用を考えた場合、金属ばかりでなく、耐火レンガやコンクリートといった非金属の切断、ゴムライニングが施されたSS材の切断等も検討する必要がある<sup>7)</sup>。また、高線量下の作業エリアにおいては、解体技術の遠隔化についても検討する必要がある。

本報告では、金属及び非金属ともに切断が可能なプラズマジェット切断、ゴムライニングが施されたSS材の切断に適用が可能なアブレイシブウォータージェット、被ばく低減対策に有用な遠隔解体技術について紹介する。

#### 4.1 プラズマジェット切断

プラズマジェット切断は、Fig.13に示すようにトーチ内の陰極と切断対象物間の放電により発生する高温プラズマにより切断を行う従来のプラズマアーク切断とは異なり、トーチ内の陰極とノズル先端部の間で放電を行い高温のプラズマを発生させ切断を行うものである。

環境技術課においては、1990年頃から1996年頃に渡りプラズマジェットトーチに関する開発を実施しており、熱的条件が厳しくなるトーチのノズル部の材質をCu-Zr合金にすること、ノズル径と拘束部の長さの比を3.0にすることにより、市販のプラズマアークのトーチと同等の寸法及び重量、操作性並びに耐久性を有するプラズマジェットトーチを完成させた<sup>8)</sup>。

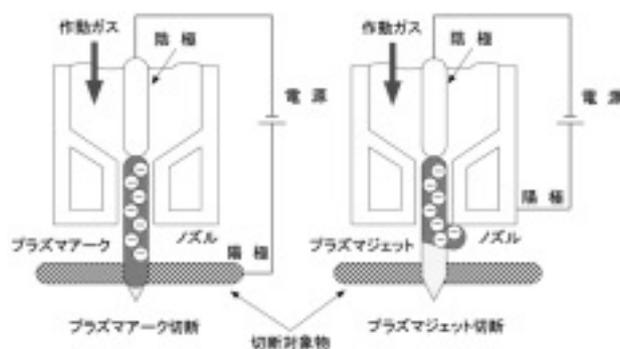


Fig.13 Plasma Cutting Method

本プラズマジェットトーチを用いた切断試験においては、SUS材及び耐化レンガともに45mmの厚さまで切断することができた。また、高温プラズマの熱衝撃作用を用いると150mm厚の耐化レンガも破砕することができた<sup>9)</sup>。

SUS材及び耐化レンガの切断状況を Fig.14 に示す。

#### 4.2 アブレイシブウォータージェット

酸やアルカリを貯留する貯槽類には腐食対策として内面にゴムライニングを施しているものがある。ライニングに使用しているゴムが不燃あるいは難燃性ののであれば、プラズマジェット等の熱的切断が適用できるが、ゴムが可燃性であった場合には、熱的切断はもちろん、機械的な切断であってもチップソーやディスクグラインダーのように高速に回転するものは発火する可能性があるため使用できない。このような場合には、アブレイシブウォータージェットを用いるのが効果的である<sup>10)</sup>。

アブレイシブウォータージェットは高圧水(200~300MPa)を鋳鉄グリッド等のアブレイシブとともに噴射させ切断する技術であり、前述したチップソーやディスクグラインダー、またシャー等のせん断装置と比べ反力が非常に小さいという特徴を有する。また切断に使用する水や鋳鉄グリッドが二次廃棄物として発生するが、他の機械的切断方法でも切削油が二次廃棄物として発生することから、処理・処分に係る負担はそれほど大きくないと言える。

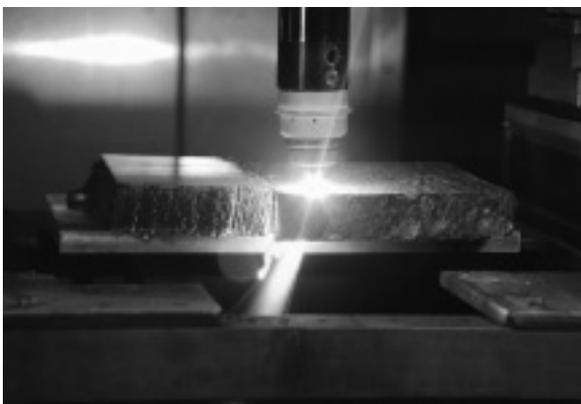


Fig.14 Plasma Jet Cutting  
(Cutting of SUS and Refractory Brick)

環境技術課においては、2000年にアブレイシブウォータージェットを用いたゴムライニング鋼板(SS400材)の切断試験を実施している。

試験に用いたゴムライニング鋼板はSS400の厚さが6mm、ライニング用ゴムの厚さが5mmのものであったが、水圧が約300MPa、アブレイシブ供給量が0.4kg/min、スタンドオフが2~20mmに変化するという条件で300mm/minの速度で切断できることを確認した<sup>10)</sup>。

Fig.15 にアブレイシブウォータージェットによる切断状況を示す。

#### 4.3 遠隔解体技術

解体技術の開発に際しては解体対象となる施設・設備の複雑な配置等にも対応可能なよう考慮する必要があり、また作業被ばくの軽減からロボット等との組み合わせによる自動化及び遠隔操作技術の適用も不可欠である。

これに対しては、ロボットあるいはマニプレータが、解体治工具の搬送と解体対象物への取り付け取外しの作業を受け持ち、解体治工具が解体対象物に取り付けられた後は、解体治工具が単独で作業を行うという方法が有効である。環境技術課においては、ロボットやマニプレータでハンドリングできる配管用の切断ツールとして「メタルソーツール」と「プラズマ切断ツール」を開発した。

メタルソーツールは、4.9MN/m<sup>2</sup>以上のクランプ力で切断対象物である配管を把持、固定し、ツ

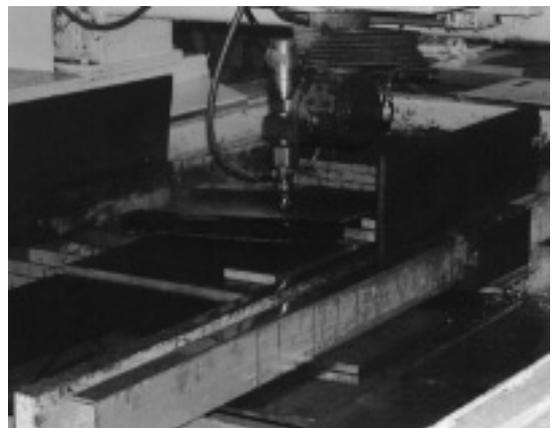


Fig.15 Abrasive Water Jet  
(Cutting of Rubber Lining Steel Board)

ル内に設けた回転刃の押しつけ機構により、配管に回転刃を押し付けながら0.3mm/minの回転速度で20A(外径:27.2mm φ)~50A(外径:60.5mm φ)の配管を自動で切断する装置である<sup>11)</sup>。Fig.16にメタルツールによる配管の切断状況を示す。

一方、プラズマ切断ツールも4.9MN/m<sup>2</sup>以上のクランプ力で40A(外径:48.6mm φ)~100A(外径:114.3mm φ)の切断対象の配管に把持、固定することができる。本ツールにはプラズマトーチが備わっており、回転速度2~30mm/min(プラズマトーチ先端の周方向の移動速度)の範囲で可変でき、自動で配管を切断することができる<sup>11)</sup>。Fig.17にプラズマ切断ツールによる配管の切断状況を示す。

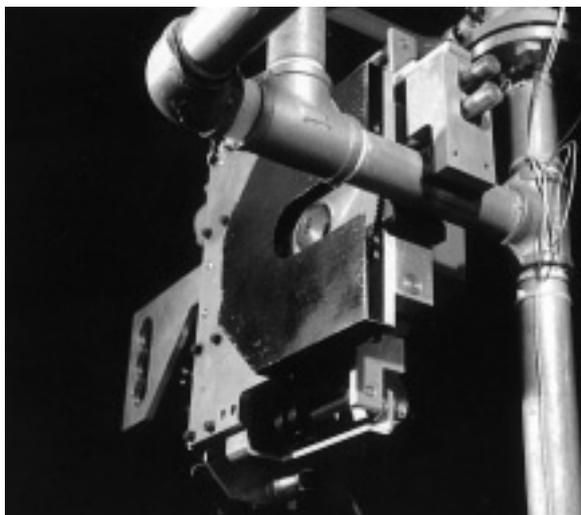


Fig.16 Metal Saw Tool  
(Cutting of SUS Pipe)



Fig.17 Plasma Cutting Tool  
(Cutting of SUS Pipe)

## 5. あとがき

環境技術課において開発した廃止措置に適用する測定・除染・解体の各要素技術について紹介した。

実際の廃止措置においては、施設の種類、解体撤去対象物の特徴を考慮し、コストの低減や効率化、廃棄物の発生量の低減、作業被ばくの低減を図る必要がある。

コストの低減や作業の効率化の面では、レーザー光のように除染と解体の両方に用いることができるツールを開発することも有用である。

廃棄物の発生量の低減では、放射性廃棄物でない廃棄物と放射性廃棄物との区分、放射性廃棄物のうちクリアランスレベル以下となるものの区分を適正に行うための測定技術を開発すること、除染作業における二次廃棄物の発生抑制や効果的な回収、安定処理に関する技術開発も重要である。

また、廃止措置のどの段階においても、作業者の被ばく低減を図ることは重要であり、ロボットやマニピュレータ等の遠隔技術は、測定及び除染技術とも組み合わせ利用する必要がある。

今後の廃止措置に備え、適用すべき測定・除染・解体等の要素技術を開発して行くことは大変重要である。しかし、技術開発には相当の費用と期間を必要とすることから、経済性や時間的制約を受けるケースにおいては、既存の技術を上手く応用することや、複数の技術を上手く組み合わせることにより対応を図ることが重要である。

## 参考文献

- 1) 谷本 健一、菅谷 敏克、原 光男他、“大洗工学センターにおける核燃料サイクル施設のデコミッションング技術に関する研究開発”、動燃技報、No84、(1992)。
- 2) 宮尾 英彦、“放射性廃棄物処理技術開発” 動燃技報、No. 73、(1990)。
- 3) 原 光男、“デコミッションング技術の開発”、PNC TN9530 93-001、(1993)。
- 4) 福井 康太、堂野前 寧、原 光男、他、“高圧ドライアイスブラストシステムによる廃棄物処理の効率化”、日本原子力学会「1994春の年会」要旨集A 4、(1994)。

- 5) 小川 竜一郎、森下 喜嗣、石島 昇、他、“高圧ドライアイスブラスト除染技術開発 (III) (パレル型及び吸引型ドライアイスブラスト除染試験)”、PNC-TN9410 97-061、(1997).
- 6) 小川 竜一郎、福井 康太、谷本 健一、“レーザ除染技術の開発”、サイクル機構技報、No. 15、(2002).
- 7) 谷本 健一、照沼 誠一、“核燃料サイクル施設のデコミッショニング技術に関する研究開発”、デコミッショニング技報、第11号、(1994).
- 8) 福井 康太、森下 喜嗣、谷本 健一、“解析的手法によるプラズマジェットトーチの最適化”、動燃技法、No.104、(1997).
- 9) 福井 康太、根本 正信、“解体用プラズマジェットトーチの開発”、日本原子力学会「1995春の年会」要旨集L25 (1995).
- 10) 吉澤 俊司、小川 竜一郎、近藤 等士、“旧「常陽」廃棄物処理建家ゴムライニングの施された廃液タンクの解体技術の開発”、JNC TN9410 2001-007、(2001).
- 11) 谷本 健一、“核燃料施設のデコミッショニング技術開発”、PNC TN9450 98-002、(1998).

# **RANDEC's Capability**

**Radioactive Waste Management and Nuclear Facility Decommissioning Technology Center (RANDEC) has contributed to the establishment of decommissioning technology, and promoted the investigation on radwaste treatment and disposal business including selection of disposal places for radwaste from RI facilities, institutes etc.**

**The capability and service of RANDEC are ;**

**to implement decommissioning research, development and investigation.**



**to provide technical information on decommissioning.**



**to train for decommissioning.**



**to investigate radwaste treatment and disposal business including site selection of disposal place for radwaste from RI facilities, institutes etc.**



**to inform and enlighten the public about decommissioning and radwaste treatment and disposal business.**

© デコミッションング技報 第44号

発行日 : 平成23年9月30日

編集・発行者 : 財団法人 原子力研究バックエンド  
推進センター

〒319-1107 茨城県那珂郡東海村豊白一丁目3-37  
Tel. 029-283-3010  
Fax. 029-287-0022

ホームページ : <http://www.randec.or.jp>  
E-mail : [decomi@randec.or.jp](mailto:decomi@randec.or.jp)