

福島第一原子力発電所の廃炉計画に対する 検証と提案

プランAからプランB、そしてプランCへ

佐藤 暁

原子力コンサルタント



2021年3月

著者紹介

佐藤 暁（さとう・さとし）

2002年までGEの原子力事業部の日本法人に勤務。18年間にわたり、日本国内の沸騰水型原子炉（BWR）において、100以上の検査、補修、改造、新技術導入など大小のプロジェクトに関わり、トラブル対応のノウハウを学んだ。

2002年に退職し、以降は個人の原子力コンサルタントとして、BWRプラントの検査（Inspection）、欠陥評価（Flaw Evaluation）、補修（Repair）、改造（Modification）に関する新技術のほか、主に米国の規制情報（regulatory information）を日本の顧客に提供している。最近は、原子力関係機器の製造工程チェックや助言なども行っている。

序文

東京電力福島第一原発事故発生から9カ月後の2011年12月、東京電力は廃炉を30～40年以内に完了させると発表した。2041年から2051年の間に、同原発敷地は更地になるともとれる発表をしたのである。過去10年間で、東電福島第一原発の廃炉について、その課題の複雑さとスケールの大きさが、徐々に明らかになってきている。それは、社会と技術への挑戦という点で類をみない。それにもかかわらず、「30～40年で廃炉」という目標は、2011年に設定されたまま変わっていない。

現ロードマップの実現可能性と代替案とは？

グリーンピースは、廃炉の進捗状況と代替案をよりよく理解するために、2002年まで18年にわたり、ゼネラル・エレクトリック社（GE）で東電福島第一原発を含めた原子力事業に携わってきた原子力コンサルタントの佐藤暁氏に本報告書の執筆を依頼した。GEは日立、東芝などと協力して東電福島第一原発を設計した。

佐藤氏の分析は、東電と日本政府の現計画に多くの問題があることを指摘している。そして、中長期ロードマップは計画通りには進まないと結論付けた上で、佐藤氏は代替案「プランC」への移行を提案している。

東電福島第一原発事故が発生してから10年後の今、21世紀最悪の原発事故の現実を認識し、日本政府と東電は、「30～40年で廃炉」という絵空事を見直すべきである。

ショーン・バーニー（グリーンピース・東アジア）

摘要

福島第一原子力発電所の事故が発生してから10年が過ぎた。廃炉を完了させるまでの期限については、依然、事故の発生当時と同じ30～40年以内が掲げられたままである。実際現場では、過去の10年間で目標のマイルストーンも達成されている。しかし、本報告書の考察によれば、今の工程は、ゆくゆく行き詰る。当時の前提条件を見直す必要がある。本報告書では、以下の問題点が論じられる。

- ・ 使用済燃料の取り出し
- ・ 汚染水の低減
- ・ 燃料デブリの取り出し時期の延期
(50～100年)
- ・ 「ドライ・アイランド」の造営と汚染の閉じ込め
- ・ 敷地の放射性廃棄物処理施設としての長期運営

実のところ、東京電力と原子力損害賠償・廃炉等支援機構（NDF）が主導している現行の廃炉の考え方には、公約の期限以内で完了させる意図が見出せないのである。

福島第一原子力発電所の事故に対する処理は、当面の危機的な状態から脱するための対応を、ステップ1、ステップ2として実施し、その後の実施計画に対しては、第1期、第2期、第3期からなる中長期ロードマップが策定された。それらのうち、第1期は、2013年11月、4号機の使用済燃料プールからの燃料取り出しが始まったことで達成が宣言された。

続く第2期は、原子炉圧力容器からペDESTAL内に崩落した燃料デブリ回収作業の開始をもって始まりとされている。NDFは、明らかに現実的でない初期の計画である「冠水－上アクセス」の工法、すなわち、格納容器を冠水させ、原子炉圧力容器の上からアクセスして水中で燃料デブリを回収する概念（ここでは「プランA」と呼ぶ）の見直しにしばらく躊躇した。最終的にこれを断念したのは、2018年になってのことである。このとき、これに代わる工法として「気中－横アクセス」の概念（ここでは「プランB」と呼ぶ）が提唱された。これによる燃料デブリのサンプル採取のパイロット試験を実施するのに、2号機が選ばれている。その開始は、当初2019年度下半期のはずだったが、2021年度に延期され、さらに

2020年12月になって、2022年度への延期が発表されている。

この「プランB」は、少量のサンプル採取までならば実行可能であるかもしれないが、本格規模での回収として有効な方法ではない。そのための方法は依然と未開であり、1号機と3号機に対しては、少量のサンプル採取についてさえ、計画が定まっていない。作業場所の放射線レベルが高過ぎるのである。

事故の発生からもうすぐ満10年が経つが、その間に福島第一原子力発電所の景観を最も変化させたのが、1,000基を超えるタンク群である。相変わらず燃料デブリの冷却には水が注入され、これが凍土壁によっても遮断できない地下水と混合して日々汚染水が生産され続けているための結果である。これを低減させる目標は掲げられているが、問題を終結させる効果的な方法は示されていない。

使用済燃料の取り出しも途上にある。4号機においては、2013年11月に着手され、2014年12月22日までに合計1,533体に対する作業を完了した。しかし、続く3号機に対しては、2019年4月15日に開始されたが、作業ペースは平均1日1体未満に落ち、ようやく2021年2月28日に566体あった最後のバッチの移動を終えた。この後、2号機に対しては2024年～2026年、1号機に対しては2027年～2028年の実施が予定されているが、いずれも当初の計画から顕著に遅れている。使用済燃料は、一旦、共用プールに移動させられた後、最終的には乾式キャスクに装荷されることになっている。

しかし、汚染物質にしる、放射性廃棄物や使用済燃料にしる、そもそもそれらに対しては、国内において、然るべき行き場が決まっているわけではなく、そのまま敷地内に、期限もなく留まり続けることになる。したがって、仮に何とか燃料デブリが回収されたにしても、それもまた敷地内に留まり続けることになる。結局、福島第一原子力発電所は、すでに放射性廃棄物の保管場所であり、この先も長くその状態のままであり続けることになる。それが、ロードマップには示されていない。

現状の廃炉計画の根本的な弱点は、NDFに対して問題提起をしたり、支援や技術的な助言をしたりする組織がないことである。経済産業大臣、復興大臣、外務大臣、文部科学大臣、厚生労働大臣、農林水産大臣、国土交通大臣、官房長官、福島県知事、東京電力ホールディングス社長が集まる廃炉・汚染水対策関係閣僚等会議が、そのような役割を果たしているわけでもない。

中長期ロードマップは、形の上では政府を代表する廃炉・汚染水対策関係閣僚等会議によって作成され、これを実行する具体的な方策が、毎年更新される原子力損害賠償・廃炉等支援機構（NDF）による技術戦略プランである。ただし実態は、中長期ロードマップが、NDFへの下達文書なのでも、技術戦略プランの上位図書なのでもなく、ほとんどただの概説版に過ぎないことが、その内容から明らかである。つまり、中長期ロードマップの内容は、むしろ技術戦略プランをボトムアップして作成されている。そのことから、NDFは、監督機関が不在であり、検討や意思決定において外部からの干渉も少ない組織であるように思われる。

本来、ロードマップと言うからには、目的地までの幹線道路が示されていなければならない。そして、廃炉を完遂するための幹線道路は、燃料デブリの処理に関する技術戦略のはずなのであるが、NDFのこれまでの取組は、これが弱々しく心許ない。

本書では、現行の「プランB」に代わる案（プランC）についても概説する。まずは、「ドライ・アイランド」を造営して地下水の流入を止める。既設の建屋の気密性・水密性を強化し、長期間の耐久性を向上させる。その上で、近い将来の本格規模での燃料デブリの取り出しを見送る。それによって作業者の受ける放射線を減らすと同時に、ロボット技術の進歩を待つ。50年でも100年でも必要なだけ待てばよい。40年で廃炉を完遂するという現行案を断念することは、失敗というよりも回避不能な現実である。代案は、あるか否かなのではなく、無理な現行案に置き換わるべきものとして考案されなければならないものであり、「プランC」は、複雑な現実の理解の上で考案した。変化の時である。

目次

1	概要 – 福島事故からの10年とその先の展望	01
1.1	40年で緑地に復旧	01
1.2	ロードマップの立案（2011年）と「プランA」	01
1.3	国際廃炉研究開発機構（IRID）の設立（2013年）と「プランB」	04
1.4	プランBの意味すること	07
1.5	現行のロードマップと技術戦略プランに対する見直しの必要性（プランC）	08
2	政府による中長期ロードマップとNDFによる技術戦略	10
2.1	汚染水対策	12
2.2	使用済燃料プールからの燃料取り出し	16
2.3	燃料デブリ取り出し	17
2.3.1	全般	17
2.3.2	2号機	19
2.3.3	3号機	20
2.3.4	1号機	20
2.3.5	頓挫が懸念されるプランB	21
2.4	廃棄物対策	33
2.4.1	福島第一原子力発電所における廃棄物の貯蔵計画	34
2.4.2	原子力発電所の廃炉に伴って発生する廃棄物	34
2.4.3	燃料デブリ以外の廃棄物	36
3	代案	38
3.1	ロボット（ヒト型運動能力のあるヒューマノイド）の利用	41
3.2	原子炉建屋の気密性・水密性の強化	42
3.3	放射性物質を内包した建屋群の耐久性	43
4	結論・提案	44

主な技術用語の解説

BWR – 沸騰水型原子炉 (Boiling Water Reactor) と呼ばれる炉型のことで、福島第一原子力発電所にある6基には、すべてこの炉型が採用されていた。冷却材と減速材軽水が使われる。原子炉内は約7MPaの圧力で運転され、285°Cで沸騰した蒸気が直接タービンを駆動する。その蒸気は冷却されて復水となり、再び原子炉に送られ、循環を繰り返す。

CRD – 制御棒駆動機構 (Control Rod Drive) とは、中性子吸収材を含んだ制御棒の引抜きと挿入を行わせるピストン構造の装置のことで、原子炉の核反応を制御する機能を担う。制御棒を介して原子炉の反応度を制御することで、原子炉の起動や停止操作の際、通常運時の出力変動を行う際、および緊急停止が必要な際に、水圧を利用して駆動される。

コリウム – 原子炉内の核燃料は、原子炉を停止させてもその直後には、故障により本来の冷却機能が失われた場合には、内包する核分裂生成物の崩壊熱によって高温に過熱され損傷する。その状況がさらに進行していくと、二酸化ウランのセラミック製燃料ペレットが溶融し、ジルコニウム合金製の燃料被覆管や炉心を支える金属製の構造物も溶融し、さらに原子炉圧力容器の底部が損傷して崩落 (メルトスルー) してからは、これらの溶融物がコンクリートをも融かした熔岩状の夾雑物を形成し、これがコリウムと呼ばれる。チェルノブイリ事故の場合、その固化したものは、「チェルノビライト」と命名された。

燃料デブリ – 上述の「コリウム」とほぼ同義であるが、燃料ペレットが溶融しないまま破損した被覆管から外部に放出された場合には、一緒に融けて金属やコンクリートとの夾雑物を形成しないケースも考えられ、「燃料デブリ」の範囲にはそのような物質も含まれる。1号機の場合で約190トン、2号機と3号機の場合で約260トンと推定され、それぞれのうちほぼ半分を二酸化ウランが占める。

制御棒 – 核分裂に必要な熱中性子を吸収する材料 (BWR用には主に炭化ホウ素の粉末を細いステンレス鋼のチューブに充填したものやハフニウムの板が選ばれる) を十字形の断面の長い棒状に成形した機器。その下端はCRDと接続され、4体 (2x2) の燃料集合体の中心の隙間を上下に摺動することで、炉

心への挿入や引抜きが行われる。そのため、1基の原子炉当たりの制御棒の数は、燃料集合体の数のほぼ4分の1となる。BWRの制御棒は炉心の下から上に向かって挿入され、上から下に向かって落下させられるPWRの設計とは対照的である。燃料よりも融点が高いため、コリウムや燃料デブリに含まれることになる。

CRDハウジング – 個々のCRDは、円筒形をしたステンレス鋼製の本機器の中に収納されている。個々のCRDハウジングは、原子炉圧力容器底部の下鏡を貫通して取り付けられているため、外側にある部分は一次系圧力バウンダリーを構成する。制御棒の数と同数あるため、原子炉圧力容器の下はCRDハウジングが密集しており、それらに対する水平方向の耐震性を確保するためCRDレストレント・ビームによって縦横に拘束されており、原子炉圧力容器への物理的なアクセス性を阻んでいる。溶融して崩落した燃料デブリの一部は、これらの機器や部品に滞留、付着している可能性がある。

臨界 – 核分裂性物質の核分裂が持続的に起こる状態のこと。1回当たりの核分裂によって発生する平均約2.5個の中性子のうちの1個が、他の物質による吸収や系外への漏洩を免れて次の核分裂に費やされる場合に成立する。これを上回る状態 (超臨界) の場合には炉心出力が急増し危険である。そのような状態は、使用済燃料プールに保管された使用済燃料や原子炉圧力容器から崩落して蓄積した燃料デブリの山でも起こり得るため、保守的で入念な評価が必要である。

スクラム – 原子炉の緊急停止操作のこと。危険な状態を検知することで自動的に作動するが、運転員が手動スイッチで作動させることができる。この機能に対する作動信号が投入された場合、制御棒が数秒以内で全長挿入され、核分裂が停止する。米国シカゴに建設された世界最古の黒鉛型原子炉で、安全制御棒 (Safety Control Rod) を、滑車を介したロープで吊りし、異常時にこれを斧 (Axe) で切断する役割の人物 (Man) を配置していたことがこの略語の語源となっている。

原子炉圧力容器 – RPV (Reactor Pressure Vessel) とも略記される。中心部に燃料集合体を配置した炉心が設置された高温、高圧に耐える設計の厚肉の低合金製圧力容器。放射性物質に対する閉じ込め機能としては、燃料ペレット、被覆管に次いで、3番目の障壁である。

炉内構造物 – 原子炉圧力容器の内部にある構造物全般をいう。主にステンレス鋼とニッケル基合金製で、特に炉心部分を垂直方向または水平方向に支持する構造物に対しては、炉心支持構造物という分類の名称が与えられている。炉心溶融に伴ってそれらの中のかなりの部分が一緒に融け、燃料デブリの一成分となっている。

格納容器 – 放射性物質を閉じ込める機能を担う安全系機器で、原子炉圧力容器の外側に設けられた気密容器。GEによるBWRの設計の進化により、マークI型からマークIII型まで開発されたが、福島第一原子力発電所の場合、1～5号機にはマークI型、6号機にはマークII型が採用されている。

ドライウェル – 格納容器の上部のスペース。マークI型格納容器の場合はフラスコ形をしている。主蒸気配管破断 (MSLB) を含む冷却材喪失事故 (LOCA) が発生した場合の圧力抑制のために用意された水を貯蔵したサブプレッション・プールがウェットウェルと呼ばれるのに対する対語でもある。LOCA発生時に放出される高温の水と水蒸気や、炉心損傷事故に発展した場合に放出される放射性物質は、事故直後にはドライウェル内に留められることになるが、事故が悪化した場合には、ドライウェルも劣化、損傷し、放射性物質が外部に漏洩することになる。原子炉の運転中は、水素爆発を避けるために内部を窒素ガスで置換している。

ペDESTAL – ドライウェル内に原子炉圧力容器を設置するために設けられた鉄筋コンクリート製の円筒形台座のこと。ドライウェルはフラスコの球部を有するため、コンクリートで平坦な床面が設けられ、ペDESTALはその中心に設置されている。CRDの水圧配管の布設やメンテナンスのためのCRDの搬出用、作業者の出入り用として、大小数カ所の長方形の開口部がある。床面には2カ所にドレン・サンプルも設けられている。溶融炉心が原子炉圧力容器の底部を

貫通して崩落した場合、燃料デブリ (コリウム) の大部分はペDESTAL内に溜まることになるが、一部は底部にある作業者のアクセス用開口部から外側に流出する。

X-6ペネ – 「ペネ」とはPenetrationの略で、格納容器の内外を貫通する開口部のことで、原子炉運転中は閉鎖されている。多数ある「ペネ」のうちX-6ペネは、CRDをメンテナンスのためにペDESTALから原子炉建屋に搬出するために設けられている。廃炉計画の関係者は、燃料デブリの蓄積場所であるペDESTALに最短でアクセスするためのルートとして着眼しているが、回収可能な範囲はかなり狭い領域に限定されると思われる。

サブプレッション・チェンバー (トーラス) – LOCAが発生した際には、破断口から噴出する高温の水の気化と水蒸気によって、格納容器内部の圧力が急上昇する。そこでこれによって格納容器が破損するのを防ぐため、発生した蒸気を凝縮させる冷却水が格納容器内に蓄えられており、その部分がサブプレッション・チェンバーまたはサブプレッション・プールと呼ばれる。特にマークI型格納容器に属するサブプレッション・チェンバーに対しては、その形状がドーナツ形をしていることからトーラスとも呼ばれる。

ダウンカマー – ドライウェルは、その内部の床面において8本のベント配管を介してトーラス上部と連結しているが、LOCA時にドライウェル内で発生した蒸気をサブプレッション・プール水で効率よく迅速に凝縮させるため、サブプレッション・プールに貫入した各ベント配管の先端は、トーラス内部でこれに沿って一周するベント・ヘッダーに連結し、これにダウンカマーと呼ばれる100本前後の配管が接続されて垂直下方に伸び、その下端が水面よりも十分深いところまで伸びている。

ホットセル – 特に高線量率の放射性物質や人体に危険なアルファ放射性核種などを安全に取り扱うために設計された設備。作業者が直接触れる必要がなく、通常は鉛ガラスの窓を通して内部の様子を観察しながら、マニピュレータを使ってこれらを取り扱う。

1. 概要 – 福島事故からの10年とその先の展望

1.1. 40年で緑地¹に復旧

巨大な津波を伴って2011年3月11日の東日本大震災がきっかけとなり発生した福島第一原子力発電所の重大事故。まだ、この事故の発生からそれほど時間が経っていない頃、すなわち、まだ原子炉圧力容器や格納容器の健全性、中の損傷状況、作業環境などが十分に把握されていなかった2011年12月21日、東京電力は、そのような状況にもかかわらず早々に、「30年ないし40年以内に緑地に戻す」との約束ともとれるような目標を発表した。つまり、廃炉と汚染物質の撤去を、2050年頃までには終えさせるというものであった。

以来、このときの原稿のロードマップが発表されてから、これには4回の改訂が今日までに加えられている。²

40年という当の発言者が、その職位にはすでおらず、まだ存命かどうかさえわからないような遠い将来に対する決して責任が問われることのない約束。具体的な方法、実現性の検討がほとんどないままでの、取り敢えず事故の被災者や国民の憤りを収める

ための政治的な声明だったと思われるが、筆者はこれを、困難というよりも実質的に絶望的で、目指す目標として掲げるべきではないと考えた。

というのも、「緑地」への復旧とは、たとえば米国における廃炉の場合の環境保護庁（EPA）による基準によれば、0.04mSv/年（約0.000005mSv/h）以下とすることを要求し、これを放射線レベルとして計測することは、自然のバックグラウンドに埋もれてしまつて不可能であることから、土壌の放射能濃度によって確認することになり、その値が7.4Bq/kgという極めて低い値となることを思ったからである。そして、これが事故後に引き上げられたクリアランス・レベルの8,000Bq/kgはもちろん、それ以前の100Bq/kgをも大きく下回る濃度であり、そのような低レベルにまで汚染した土壌をすべて除去するとすると、その量は、1,000万m³にも達すると推定されたからである。

1.2. ロードマップの立案（2011年）と「プランA」

福島第一原子力発電所の廃炉工程における最大の難関は、事故によって損傷し、原子炉圧力容器とその外側に融けて流失した1～3号機の核燃料、すなわち燃料デブリをどのようにして回収するかであると認識されていた。東京電力は当初、そのためのアプローチとして、1979年に発生したスリー・マイル・アイランド（TMI）事故における実績を踏襲しようとした。この概念は、以下の作業ステップからなる。

- ・ 原子炉圧力容器の上蓋を外す。
- ・ 放射線の遮蔽のため開放した原子炉容器を冠水する。
- ・ 各種の水中遠隔操作装置を駆使して冠水した炉心にアクセスする。
- ・ 燃料デブリを取出す。
- ・ 取り出した燃料デブリを遮蔽容器に収納して搬出する。

1. 「緑地」とは、通常、米国における廃炉工程の終了にあたって一面に芝を植えて緑化し、“Green Field”と呼んでいることから、本書においてもその訳語を当ててはいるが、実際には緑化の義務はなく、いわゆる「更地（さらち）」と表現してもよいところである。両者は同義語と見做してもよい。

2. 経済産業省の「中長期ロードマップ」のアーカイブによれば、2021年3月現在までに、2011年12月11日付けの原稿に続き、2012年7月30日、2013年6月27日、2015年6月12日、2019年12月27日と4回の改訂を経ている。
https://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/archive_mltr.html 参照。

確かにこの概念は、原子炉圧力容器さえ健全であれば、たとえ上蓋の取り外しや、炉心の上部にある湿水分離器、蒸気乾燥器が著しく損傷していてもそれらを取り除くのに長い時間を要したとしても、最も確実に安全な方法のはずである。このオーソドックスなアプローチを今、プランAと呼ぶことにしよう。しかし筆者は、東京電力を中心とした検討チームが、このプランAを早々に切り捨てる決断をできなかった技術的能力と意思決定プロセスに、強い疑いを抱いた。

プランAがTMIとはまったく事情の異なる福島第一原子力発電所の1～3号機に適用できないことは、細かい技術情報がすべて揃っていなくても、十分明白だったからである。

まず、原子炉圧力容器の底部に大きな穴が空いてしまっていること、その穴から融けた燃料デブリの大部分が流出してしまっていることが明らかだった。したがって、これを冠水することができず、また出来たところで、取り出す燃料デブリの大部分がもはやそこにはない。そこで検討チームは、冠水のバウンダリーを原子炉圧力容器の外側、すなわち格納容器に移し、相変わらず上からのアクセスによる遠隔水中作業によって燃料デブリを取り出す修正を加えた。

しかし、そのような修正案も延々と検討を続けるに値するものでないことは、すぐに気付いてよいはずであった。事故で高温高圧に曝露された格納容器は、至る所に損傷と劣化が生じており、とても長期にわたって安全に冠水状態を維持できるものでないことが明らかだった。現に、原子炉圧力容器から漏れた水は、格納容器によっても貯留することができず、すぐさまその外側に漏洩していた。そもそも格納容器とは、膨大な枚数の薄い炭素鋼板を溶接で繋ぎ合わせ、防蝕用に塗装したものであるが、事故に伴う高温、高圧への曝露に加え、熱膨張などによる複雑な荷重を受け、塗装は剥離し、剥き出しになった金属面には、冷却用として注入された海水が接触し、腐食も考えられる。その上アクセス性が悪いために、損傷箇所、劣化箇所を特定するための検査も修理もままならない。そのような容器に水を張り、劣化や地震によって大規模な裂傷が生じて大破することを恐れな

がら、何年もかけて燃料デブリの取り出し作業を行うことが、まともな発想であろうはずがない。

しかし、検討チーム³は、この実現性の見込まれない危険なプランAをなかなか手放さず、無意味な実験と検討に長い時間と膨大なコストを浪費した。

地下水、汚染水処理、燃料デブリの冷却

さて、発熱が続く燃料デブリを冷却するため、1～3号機の原子炉圧力容器に対しては、注水が続けられた。水は燃料デブリから崩壊熱を除去すると共に、セシウムやストロンチウム、トリチウムなどの可溶性の放射性物質を抽出し、格納容器から漏れ、原子炉建屋からも漏れ、今日に至るまで不明な経路を辿って、タービン建屋地階から湧出した。これには、西の阿武隈山地に降った雨が、伏流水として福島第一原子力発電所の敷地内を地下水となって流れ込むため、原子炉圧力容器に対する注水を大幅に上回る常時大量の汲み上げを必要とした。汲み上げた水には油や塩分も含まれていたため、放射性物質を吸着して処理した水をタンクに蓄える前に、さまざまな処理装置を通過させる必要があった。

こうして、燃料デブリの冷却のために注水が続けなければならない、注水続ける限り、事故の初期対応において注入された海水に含まれていた塩分と燃料デブリからの高濃度の放射性物質が抽出されてタービン建屋地階から湧出し、これが合流する地下水によって増量し、処理装置で浄化された水は、一部は再び冷却水として1～3号機の原子炉圧力容器に注水されるものの、大部分の余剰水は敷地内に貯蔵されなければならない、広い敷地内には、タンクファームが急速に拡張されていった。貯水容量1,000トンもの巨大な鋼製のタンクが、3日ほどで一杯になり、1年も経つうちに新たに100基以上が並んでいく。

処理装置は、化学薬品で沈澱させる原理のもの、ゼオライトに放射性セシウムを吸着させるもの、塩分を分離する逆浸透（RO）膜装置などが初期の段階から使用され、放射性物質を含んだ沈澱物のスラッジや

3. 同検討チームは、東京電力を中心とする原子力産業界と資源エネルギー庁、原子力安全・保安院からの代表者らで構成。東京電力による「福島第一原子力発電所1～4号機の廃炉に向けた中長期ロードマップ」（2011年12月21日）参照。
http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/betu11_e/images/111221e14.pdf
廃炉の工程表は、2011年8月に立ち上げられた原子力委員会の専門家グループによって作成され、これによると、燃料デブリの取り出しに10年以内で着手することを目標とするが、廃炉の完了には少なくとも30年を要するとのことであった。

使用済の吸着塔は、著しい高熱を発生するほどであった。そして、それらの安全な保管場所も確保しなければならなくなった。これらの装置で処理された水は、依然とある濃度の放射性物質を含んでいて、より高性能の吸着装置が必要とされた。

劣化した建屋の補強、使用済燃料プール

事故によって原子炉が損傷したのは1～3号機であったが、水素爆発によって原子炉建屋が著しく損傷したのは、1、3、4号機であった。2号機は、1号機の水素爆発の衝撃によって脱落したブローアウト・パネルが排気口となって水素が排出されたことで爆発が免れ、一方4号機は、3号機で格納容器ベントを行ったときの水素が、合流する排気ダクトを逆流したことで、その爆発によって激しい破損を起こした。水素爆発の威力は、原子炉建屋最上階の天井と壁を粉砕し、周辺の広い範囲に放射性物質に塗れた落下物を散乱させた。3号機の場合には、その落下物によってタービン建屋の天井に巨大な穴を作り、その後そこから雨水が流れ込んだ。1号機の場合には、床面をも損傷させた。そして爆発したすべての原子炉建屋において、天井クレーンや燃料交換台車も損傷し、上空から降り注いだ瓦礫とともに使用済燃料プールに落下したところもあった。4号機の場合には、爆発による著しい損傷が下階の構造物にも及び、最も多くの使用済燃料が貯蔵された使用済燃料プールの重みを支え続けることができなくなるのではないかと心配され、真っ先に補強が施されることになった。そして、真っ先に使用済燃料の搬出が行われることになった。

1.3. 国際廃炉研究開発機構 (IRID) の設立 (2013年) と「プランB」

実現性が見込まれない危険なプランAは早く断念され、より現実的な計画に進路変更される必要があったが、そのような気運は、東京電力と検討チームの間には、しばらく萌芽さえなかった。2013年8月、日本原子力研究開発機構 (JAEA) や電力会社 (沖縄電力を除く)、プラントメーカーなど18法人による福島第一原子力発電所の廃炉に向けた研究を行う団体、国際廃炉研究開発機構 (IRID) が設立された。⁴

IRIDは、廃炉のためのさまざまな分野の要素技術の開発を公募した。筆者はこれに、要素技術ではなく、根本的にプランAに取って代わるための新たなアプローチを210ページのレポート (フクシマ・クロージャー・プラン) としてまとめ、2013年10月23日に提出した。以下、筆者がこれに盛り込んだ主要な特徴を概述する。

1. 燃料デブリの冷却方法、燃料デブリの回収方法、汚染水の発生を抑制する方法は、相互に関連性があるため、それぞれに対する方法論を個別に検討するのではなく、全体的な戦略を構築することが重要である。
2. 燃料デブリの冷却は、その回収を、格納容器を水没させて上から行おうとする限り自動的に達成されるが、そもそも危険が大きく、対策が困難であることから断念せざるを得ない。
3. 汚染水は、燃料デブリの冷却として水を使い続ける限り発生が続く。汚染水の発生を止めるためには、燃料デブリの冷却方法を、水冷から空冷に切り替えることが条件の一つとなる。したがって、燃料デブリの回収は、空冷を維持した状態で行う必要がある。また、建屋に地下水が流入する流路の遮断も必要である。
4. 燃料デブリの空冷化は、その発生熱量を考慮する限り、格納容器の外面を放熱面として除熱することで無理なく達成できる。格納容器の外面からの放熱を維持するための気流の確保は、原子炉建屋との間にある既存の空隙を利用することで可能である。これにより、格納容器のバウンダリー自体は、十分低温に維持できる。格納容器内の機器や構造物が一部高温化するが、水冷によって低温を維持しなければならない機器や構造物が

あるわけではなく、高温化するとは言え、燃料デブリが接触しているのは、稠密に配筋された鉄筋コンクリートであり、ある程度の熱伝導が期待され、著しい強度の低下や劣化を招くほどの高温にはならないことが、熱解析によって裏付けられるはずである。

5. 燃料デブリは、注水を終わらせるだけで、崩壊熱によって徐々に乾燥化していく。格納容器内の水分、湿分は、内部の雰囲気を取り出して除湿器を再循環することで除去する。
6. 燃料デブリの回収は、地下から原子炉圧力容器の中心軸に合わせて上に向かって掘削してアクセスする。地下には、この作業用のホットセルを予め設置しておく。ホットセルの内部は、案内管を介して格納容器とバウンダリーと一体化させる。ホットセルは、研究施設や使用済燃料の再処理施設などで使われているものと同じ構造で、その外側から厚い鉛ガラスを通して内部の状況を監視しつつ、マンピュレーターによって内部にある装置や設備を操作することができる。
7. ホットセルの内部は、4つのセクションに分かれている。最初のセクションでは、案内管を介して上方に向かう多軸ロボット・アームの先端に取付けられたタングステン・カーバイド製のドリル・ビットが、燃料デブリを粉砕し、吸引回収する。回収物に対しては、臨界防止のために中性子吸収材 (炭化ホウ素) の粉末が混ぜられ、均質化された粉末のサンプルを採取して、含有される核分裂性物質の組成が分析される。2番目のセクションでは、粉末をPWRの燃料集合体の輪郭寸法を有し、長さが半分の角パイプのカプセルに充填する。3番目のセクションでは、このカプセルに蓋を取付け、溶接する。そして、このカプセルを遮蔽付の輸送容器に入れる。最後、4番目のセクションでは、輸送容器を吊り上げて搬出する。
8. ホットセルから遮蔽付の輸送容器に入れられて搬出されたカプセルは、深いプールのある専用の作業棟で、使用済燃料の貯蔵に使われるキャニスターに装荷される。カプセルは上下二段、全74本装荷して1基のキャニスターが一杯になる。全数装荷されたキャニスターは、作業プール

4. 「IRID設立のあいさつ」 (2013年8月8日) 参照。 http://irid.or.jp/_pdf/en/20130808_greeting.pdf

から遮蔽容器に入れて取り出して移動し、専用の保管エリアに、コンクリート・キャスクに入れて貯蔵する。

9. 汚染水の発生を抑制するためには、建屋に流入する地下水を遮断しなければならない。そのための方法としては、凍土壁も選択肢としてはあるが、遮水が成功しない可能性がある。そして、長期におよぶ運用にはデメリットがある。したがって、より確実な方法として、敷地の一部を取り囲むように、海に繋がる濠を掘削し、阿武隈山地からの地下水を遮断する。それによって福島第一原子力発電所の敷地を島状に隔離し、表土を不透水化し、水路を整備して、敷地内の地下水位が海面と同じになるまで低下させ、全体を「ドライ・アイランド」にする。
10. 福島第一原子力発電所の敷地一部は、緑地復旧は断念せざるを得ないが、これを外部から隔離した「ドライ・アイランド」とすることで、土地のさまざまな有効利用が図られる。大量の放射性廃棄物を埋設処理するためのトレンチも造営できる。原子炉建屋の地下にホットセルを設置する工事も地下水の問題が軽減できて施工し易くなる。濠は、セキュリティ対策の強化に使える。
11. 放射性物質を除去し、トリチウムだけを含んだ汚染処理水は、一部はコンクリートで固化し、これを濠の擁壁などに活用する。残りは、海水の潮位の干満を利用した大量の水流で希釈して管理放出する。
12. 建屋内の滞留水は、汲み上げて処理し、除去する。敷地全体が「ドライ・アイランド」となることで、建屋内に地下水が流入して汚染水が発生し続けることはなくなる。滞留水のうち、サブプレッション・プール内にあるものは、事故当時から置換されずに滞留したままである可能性があり、その処理には慎重に臨む必要がある。
13. 敷地内の建屋は、除染を行い、不要なものは解体するが、廃棄物の貯蔵庫などとして活用できるものは、適切な処理をした上でそのような目的として極力活用する。

結局、筆者の「クロージャー・プラン」に対してはIRIDの関係者に興味をもってもらうことができず、約10カ月後に7分半の説明の機会が与えられた末に無視されてしまったが、やがて東京電力からの検討チームは、従来のプランAを廃し、以上の筆者の提案と幾つか共通性のある新案へと切替えていった。ここでは、これをプランBと称することにする。

計画の見直しと原子力損害賠償機構の設立、プランB以下、プランBが具体化されていった過程である。2011年9月、官民の共同出資によって原子力損害賠償機構（Nuclear Damage Liability Facilitation Fund）が設立されていたが、2014年8月18日、同機構の役割に福島第一原子力発電所の廃炉や汚染水対策を追加して改組し、名称が、原子力損害賠償・廃炉等支援機構（NDF Nuclear Damage Compensation and Decommissioning Facility Corporation）と変更された。そして、福島第一原子力発電所の廃炉計画に関しては、政府が「中長期ロードマップ」を示し、NDFが「戦略プラン」を策定することとなった。

NDFは、2015年4月30日付で「東京電力（株）福島第一原子力発電所の廃炉のための技術戦略プラン2015～2015年中長期ロードマップの改訂に向けて～」と題した報告書を発行したが、その中で燃料デブリの取り出しに関する工法の選択肢の絞り込みとして、以下を「重点的に取り組む3つの燃料デブリ取り出し工法」に掲げている。

- ① 冠水ー上アクセス工法
- ② 気中ー上アクセス工法
- ③ 気中ー横アクセス工法

これらのうち、③の工法は、燃料デブリを格納容器の横（原子炉建屋1階）から取り出す工法のことである。翌年、東京電力（株）は、東京電力ホールディングス（株）に組織と社名を変更したため、この年以降の報告書は、「東京電力ホールディングス（株）福島第一原子力発電所の廃炉のための技術戦略プラン20XX」となった。2016年7月13日付で発行された技術戦略プラン2016では、重点的に取り組む3工法が、前年のまま残っている。これらのうち「気中ー横アクセス工法」に関しては、ドライウェル底部（ペDESTAL内側、外側）の燃料デブリの取り出しには適しているが、RPV内の燃料デブリへのアクセスは難度が高いと評している。筆者のクロージャー・プランは、敢えてこのような表現に合わせるならば、「気中ー下アクセス工法」とでもなるところであるが、もちろん筆者自身、横アクセスも考慮していた。そして、やはり多軸ロボット・アームの技術が進んだとは言え、どうしても手の届かないところが発生し、特にRPV内へのアクセスは困難であろうと考え、「下アクセス」を選んだのであった。アクセスの問題さえ解決されるならば、下でも横でもこだわるつもりはなかった。

翌年度の技術戦略プラン2017は、2017年8月31日付で発行された。依然と重点的に取り組む3工法がそのまま残されているが、これらのうち「冠水－上アクセス工法」に関しては、止水のための遠隔補修技術の開発難度が高い、補修にかかる総被曝量が過大と評している。そして、2018年10月2日に発行された技術戦略プラン2018において、ようやく「冠水－上アクセス工法」、すなわちプランAが切り捨てられ、気中工法へと絞り込まれ、特に「気中－横アクセス工法」に検討を傾注するようになっている。

技術戦略プラン2019は、9月9日に発行された。この中では、小規模なパイロット試験としての燃料デブリの取り出し、収納・移送・保管の一連のプロセスについて、「気中工法へと絞り込んだときの具体的内容が説明されている。まず取り出しのための格納容器内へのアクセスはX-6ペネからで、これにエンクロージャを、気密性が保たれるように接続し、格納容器と同じ空間のバウンダリーを構成させ、その中で取り出したデブリを容器に入れる。次にこれを遠隔運搬台車に載せて原子炉建屋の外に搬出し、保管設備に搬入する。ここでは分析用サンプルを取り出し、最後に取り出され、ここまで運搬された燃料デブリを一時保管セルで保管する。以上のパイロット試験の計画が、比較的詳しく述べられている。

そして、2020年10月6日付で発行されたNDFの技術戦略プラン2020では、パイロット試験の計画がさらに具体化され、2号機を対象に、アクセス装置のロボット・アームの開発や、燃料デブリの回収装置として、パイロット試験用としては金ブラシ方式と真空容器方式を使い、より規模を拡大してからは、グリッパーツールと掘削回収ツールを使うことが提案されている。

燃料デブリの回収

以上のように、燃料デブリの回収については、2020年10月の時点においても、2号機を対象としたパイロット試験の概念に対する具体化が進んだ程度である。放射線環境や格納容器内の状態などが異なる1号機と3号機に対しては、別途検討しなければならない

い。そして、パイロット試験から得られる経験によって、次に直ちに本格規模の作業へと展開するだけの確信が得られるかと言えば、まったくそうではない。

パイロット試験では、X-6ペネからアクセスし、ペDESTAL内の最も手近にある箇所から、取り出しの最も容易な燃料デブリを少量採取することによって、比較的容易に目標を達成するだろう。しかし、本格規模の作業では、たとえばX-6ペネの直下など、ペDESTAL内でも手の届きにくい箇所があり、さらに難度が高いのは原子炉圧力容器の中である。まずはこの中にアクセスする手前には、CRDハウジングやICMハウジング、およびそれらを固定するためのスタビライザーが複雑に遮っており、さらにどうにかこれを撤去して中に入ったとしても、複雑な内部の構造物に石化して固着した燃料デブリを掻き出さなければならない。ロボット・アームには、パイロット試験の場合に比べて数カ所の関節を増やさなければならない、アクセスのための動作や先端部の位置制御がより複雑化し、故障のリスクが増す。一方、固着した燃料デブリは、かなり硬く、剥離や粉末化に時間がかかる。本格規模の作業が遂行可能であることに一定の確信を得るためには、パイロット試験の成功の後にも、まだ何段階もの実証試験をクリアしていかなければならない。

そのような前途の困難を考慮した場合、筆者は、NDFによるプランBは、パイロット試験に限っては、筆者のクロージャ－プランよりも有利であろうが、本格規模の作業に対しては、計画の具体化が依然と未熟であり、むしろかなり不利なアプローチであると考える。

燃料デブリ回収以外の廃炉作業

さて、燃料デブリの回収以外の廃炉活動にも目を向けてみよう。

汚染水対策として導入した凍土壁の建設は2014年6月に着工した。⁵ そして完成を迎え、運用が2016年3月から始まった。⁶ その導入を推進した関係者は、

5. 東京電力によるプレス・リリース（2014年6月3日）参照
https://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/2014/1237060_5892.html

6. 東京電力・鹿島建設による発表資料による
https://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/handouts/2016/images/handouts_160331_02-e.pdf

一定の役割を果たしている」と主張を曲げないようであるが、その遮水能力の実績を見る限り、彼ら自身が最も失望しているのではないと思われる惨めなものであり、費用対効果において成功だったと主張することは、著しく困難であると思われる。そして、供用が長引けば、やがて1,500本ある冷却液の配管が劣化を呈し始める。今後は、検査やメンテナンス、交換のためのコストと作業被曝が増加していく可能性がある。

結局、この遮水の失敗により、今までにも、そして今後も建屋への地下水の流入は続き、日々の大量の汚染水の発生も止めることはできない。取り敢えず約2年先までの貯蔵容量は確保したようであるが、いよいよその先の方策がなくなり、貯蔵した処理水を量的に減少させる方向に転じなければならない厳しい時期を迎えている。

使用済燃料プールからの燃料搬出は、既存の取扱設備が健在で干渉物の問題さえなければ、実績が豊富で、難度の低い作業であると言える。しかし、燃料交換台車と天井クレーンを失ったことと、大量の瓦礫がプール内に崩落したことで、作業環境と作業条件が著しく悪化し、4号機での完了から環境整備のための長いブランクを経て、ようやく2021年2月28日に3号機からの搬出を完了した。実に、1日平均1体未満の作業ペースであった。1、2号機での着手は、当初の

1.4. プランBの意味すること

NDFの技術戦略プランからは、以下の暗示が読み取られる。

・ 緑地に戻すことは無理

まず、「40年で緑地に戻す」との元々の声明は、当初期待を抱かせていたときの意味から違ってきていること。すなわち、「緑地に戻す」ことの本来の意味は、敷地の用途に対して制限や条件が課されないことで、当然、その意味であると期待していたはずなのであるが、今やそうではない。仮に計画がすべて首尾良く進められ主要な建屋が解体されたとしても、そして敷地の大部分に芝生が植えられて文字通りに緑地になったとしても、そこを他の土地と同じように、宅地として利用したり、農業や酪農を営んだり、工業団地にしたり、商業活動を行ったり、学校や官公

計画からかなり遅れてしまっている。これに対して筆者は特に批判は控えたいが、関係者には、机上の作業計画と現場の実務の間には必ず予知できない問題が発生し、思わぬ滞りが生じるものであることを、普遍的な現実であると認識して欲しい。作業環境と作業条件が著しく悪化したとは言え、作業の難度は依然比較的低いはずの作業である。しかし、それさえも10年経ってやっと半分をやり遂げたに過ぎないのである。

一方、福島第一原子力発電所の敷地内で発生する廃棄物の処理業務においては、着々と必要なインフラ整備、すなわち、貯蔵施設、焼却施設、減容処理施設などの建設が進んでいる。しかし、これらの計画は飽くまで、屋外に野晒しにできない放射性廃棄物を屋内施設に収納することだけを目的としたもので、あらゆる廃棄物が整然とそれらの施設に収納されることを意味しているのではない。むしろ敷地内には、収納される量を大幅に上回るしきい値以下の放射性廃棄物と、コンクリートの瓦礫や、鉄筋、鉄骨、配管など鋼材スクラップなどからなる一般産業廃棄物が積まれた状態となり、関係者が「リサイクル可能」と言ってみたとところで、それらに対する具体的な用途が定まり、引き取り手が現われるまでの間は、敷地内に残されたままになってしまうのである。

庁の施設として利用したりはもちろん、野球やサッカー、テニス、陸上などの運動施設、公園として利用することもできる環境にはならない。と言うのも、そのような環境となるためには、欧州の幾つかの国々で採用されている基準であるところの $10\mu\text{Sv}/\text{年}$ に適合しなければならないのであるが、土壤の汚染レベルを考慮するだけでも、まったくそのような期待は無理だからである。

しかしこのことは、決して衝撃的なわけではなく、2011年3月に事故が発生した時点ですでに分っていたことであった。そして、達成できない理由が、「40年」という期間の短さにあるというわけではない。これを80年、120年、160年と延長したところで無理なことは、放射性セシウムの半減期（約30.1年）を考慮し、 $10\mu\text{Sv}/\text{年}$ を達成するために除去され

なければならない汚染土壌の量が、余りにも膨大であることから容易に理解できるはずである。そのような無理な目標は、初めから掲げるべきではなく、期待させるべきでもなく、ましてこれに向けて無尽蔵にリソースを投じるという努力も避けるべきである。そのような努力が、地元の被災者に対する償いの仕方だという単純な考え方が根底にあるのだとするならば、もう一度現実を見つめ直し、真摯な話し合いをするべきである。

- ・ 燃料デブリの回収の目処が2号機でのパイロット試験の成功で裏付けられるわけではない

既述の通り、パイロット試験と本格規模の作業の間には、大きなギャップが存在する。NDFが絞り込んだ工法（気中一横アクセス工法）が、パイロット試験に対しては適用できても、本格規模の作業に対しても有効であるとは思われない。

- ・ 使用済燃料の処理は使用済燃料プールからの搬出だけでは終わらない

今日までに、3号機と4号機の使用済燃料プールからの搬出がほぼ完了しているが、これをもって、進捗率が約半分と判断してはならない。共用プールに移し替えをしただけなのだからである。そして、この先さらに共用プールから乾式貯蔵キャスクに詰め替えを終わらせたところで、依然と問題は解決しない。

1.5. 現行のロードマップと技術戦略プランに対する見直しの必要性（プランC）

以上のような先々の問題、すなわち超長期の時間軸での最終的な処理にまで考察を深めた場合、プランBに沿った燃料デブリの回収が、果たして最適な選択肢なのかが疑問になる。つまり、燃料デブリの回収が最終ゴールなのではなく、どうせこれを終えたところで、その後長い空白期間が生じてしまうことが不可避であるこのプランBは、NDFが説明するように、迅速性を以て取り組むべき最適で最善な選択肢なのだろうか。

いずれそのような長い空白期間が待ち受けているのであるならば、それを今の時期に充て、燃料デブリの放射性物質を拡散させない閉じ込め機能の確立だけに取らねえず専念し、その間に生まれて成長する

最終的には、それらがすべて福島第一原子力発電所の敷地から運び出され、なくならなければならないのであるが、これは未解決のバックエンド問題に繋がり、これが解決されるまでの間は、敷地内に保管され続けるか、次の一時保管場所に移されるかである。

- ・ 燃料デブリの処理も回収と保管だけでは終わらない

以上の使用済燃料の処理に関する問題は、首尾良く回収されたと仮定する燃料デブリについても言えることであり、やはり延々と福島第一原子力発電所の敷地内に保管され続けるか、次の一時保管場所に移されるかである。なお、燃料デブリに対する最終処分法には、化学的な再処理技術が適用できない。したがって、早くても、この処分に適した地層処分の施設が開設されるまでの期間、待機が続くことになる。

- ・ 固体廃棄物は貯蔵庫に収納されないものも含めて処理されなければならない

さらに以上の最終処分の問題は、福島第一原子力発電所の敷地内にある貯蔵施設で保管される放射性廃棄物と、貯蔵施設での保管を要せず、敷地内で外気に曝されたまま放置されるコンクリートの瓦礫や鋼材などのスクラップについても当てはまる。

新技術の応用の機会を探るという選択肢もあり得るだろう。

筆者がIRIDに対して提出した「フクシマ・クロージャー・プラン」をまとめたときには、このような思考が浮かぶことはなく、危険な核分裂性物質と核分裂生成物からなる燃料デブリを、原子炉圧力容器や格納容器の中で、無秩序に放置しておくのは論外であると決め付けていた。もちろんこれに最初に飛び付き、初めから回収のための探究と努力をしないという横着な選択肢がよいものだとはいえない。しかし、燃料デブリの回収を、今の技術で達成することが著しく危険で、技術的に困難で、コスト高である場合には、それも受け入れた上で、次善の策を練って

もよいのではないか。そして、そのような思考の切り替えを後退と見做すのではなく、前向きなパラダイム・シフトと考えるのである。

具体的には、格納容器を不完全ながらも一次バウンダリーとし、原子炉建屋の外表面をより密閉性の高い二次バウンダリーとする案であり、これをここではプランCと呼ぶことにする。言うまでなく、そのようなプランCは、暫定的なものとなる。しかし、原子炉建屋の構造的な健全性と密閉性の維持だけならば、100～150年程度の維持が、それほど高度な要求とは思われない。

さて、重要なのは、そのような時間稼ぎが、放射性のセシウムやストロンチウムの放射能を10分の1ほどに低減させてくれる以外、どのようなメリットをもたらすと期待できるかである。半減期の著しく長いアクチノイドの放射性核種を含む燃料デブリに対し、原子炉建屋の構造的な健全性と密閉性を強化し、その維持を延々と更新していくことが、準恒久的処分法として認められることは、将来もあり得ないだろう。そのような放射性核種を人工的に無害化する画期的技術が開発されることも期待すべきではないだろう。しかし、あらゆる産業分野で需要のあるロボット技術の飛躍的な進歩は確実に期待できる。

鉱山での掘削ロボット (Mining Robot) や潜水ロボットは、10年以上前から導入され、年々機能が進化している。米国航空宇宙局 (NASA) は、月や火星の地表で掘削作業を行うロボットの開発を行っている。しかし、格納容器内においては、障害物を避けながら階段やはしごの昇降を行うなどのより高度な運動機能が必要となるだろう。

たとえば、ボストン・ダイナミクス社が開発したヒューマノイド「アトラス」は、登場してからすでに久しく、合計28の自由度の関節を有するこのロボットの運動機能は、二足歩行は言うに及ばず、倒立、滑らかな前転、ジャンプ、後方転回を含む体操選手さながらの運動や、ドアの開閉、電動工具の使用、弁の開閉操作、配管接続といった多様なタスクもこなす。レーザーやプラズマを使った溶断、溶接なども早晚これらに加わるだろう。格納容器の貫通孔からアームを入れてといった発想は、すでに相当時代遅れなものとなっており、100年もの期間を待つことなく、多様な技能を身に付けたヒューマノイド集団が作業チームとなって、直接ベDESTAL内や原子炉圧力容器の中で工具を操り、丁寧に燃料デブリを掻

き出す作業を行うことができるようになってきていることだろう。つまり、今NDFが、自由度と運動機能の低いロボット・アームで、燃料デブリの回収をどのように行うか苦慮しなくても、遠くない将来には、これを遙かに超えるヒューマノイドの作業チームが、労働災害や放射性被曝の心配もなく、手際よく作業をこなせるようになってはいるはずである。

したがって、NDFが現時点で専心すべきことは、燃料デブリの空冷化、建屋内滞留水の処理、建屋内の除染、不要な可燃物の撤去と防火設備の設置、および、格納容器、原子炉建屋のバウンダリーに対する構造的な健全性と密閉性の強化、維持であって、燃料デブリの回収工法の開発は、せいぜい2号機におけるパイロット試験を終えたあたりを区切りとして、一旦打ち切るべきである。

そのような将来への先送りについては、倫理的に望ましくないとの考え方もあるだろう。しかし、技術力の低さ故に膨大なコストを要し、その捻出のために多額の国債を発行してその処理を将来の世代に押し付けるくらいならば、むしろその半分を基金として蓄えて引き渡した方が、将来の世代の技術者は、彼らの優れた技術力によって、それを元手に余裕で解決してくれることだろう。

2. 政府による中長期ロードマップとNDFによる技術戦略

福島第一原子力発電所の廃炉事業は、実質、東京電力ホールディングスを中心とした半官・半民組織の原子力損害賠償・廃炉等支援機構（NDF）の主導で進められているが、その運用資金のスポンサーである政府を代表する組織として、廃炉・汚染水対策関係閣僚等会議が設置されている。同関係閣僚等会議が、NDFに対するオーバーサイト機関というわけではないが、政府における主管機関としての立場から、その実務を担う経済産業省が、「東京電力ホールディングス（株）福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ」を発表、適時その内容を更新し、一方NDFは、その内容と整合する形で「東京電力ホールディングス（株）福島第一原子力発電所の廃炉のための技術戦略プラン」を毎年発表している。

中長期ロードマップは、2019年12月27日付けで発表された第5回改訂版⁷が最新で、技術戦略プランは、2020年10月6日付けで発表されたものが最新であるが、前者の内容は、後者の概要版とほとんど重複している。

中長期ロードマップでは、廃炉の全工程を第1期、第2期、第3期に区切っている。なお、これが策定される前には、事故直後から安定化に向けた緊急的な対応の期間があり、これをステップ1（放射線量が着実に減少傾向にある状況）とステップ2（放射性物質の放出が管理され、放射線量が大幅に抑えられている状況）とに分け、それぞれ2011年7月、2011年12月に達成したと宣言している。続く第1期は、ステップ2の終了から初号機での燃料取り出し開始までの期間とされ、2013年11月、4号機での作業が開始されたことで、これも達成されたと宣言された。第2期は、燃料デブリの取り出しが開始されるまでの期間と定められている。これは、2号機でのパイロット試験が始まることで、2021年12月までに達成が予定されているとのことである。そして、ここから先は全て、第3期と定められており、その完了の目標を、ステップ2の完了から30～40年後と設定している。

ただし、これでは第3期の内容が膨大で漠然としており、進捗が把握し難いことから、まずは2031年末までの期間を「第3-①期」とし、次の4つの分野に対し、この期間中の具体的なマイルストーンを設定している。以下は、それらの中の例である。

1. 汚染水対策
 - ・ 汚染水発生量を100m³/日以下に抑制（2025年内）
 - ・ 原子炉建屋滞留水を2020年末の半分程度に低減（2022年度～2024年度）
2. 使用済燃料プールからの燃料取り出し
 - ・ 2号機燃料取り出し開始（2024年度～2026年度）
 - ・ 1号機燃料取り出し開始（2027年度～2028年度）
 - ・ 1～6号機燃料取り出しの完了（2031年内）
3. 燃料デブリ取り出し
 - ・ 2号機における燃料デブリ取り出しの開始（2021年内）
4. 廃棄物対策
 - ・ 瓦礫等の屋外一時保管解消（2028年度内）

前述の4つの分野が選ばれた論理は、NDFの技術戦略プランにおいて次のように説明されている。まず、放射性物質に起因するリスク低減の考え方として、英国原子力廃止措置機関（NDA）が開発したSED（Safety and Environmental Detriment）を用い、定量的に評価を行ったと述べている。

SED = 「潜在的影響度」×「管理重要度」

潜在的影響度：放射性物質が人体に取り込まれた場合の内部被曝の影響度を示す指標

管理重要度：事象の起こりやすさを示す指標

その上で、SEDに基づき、優先順位の高い3つの主要なリスク源が、次のように選び出された。

7. 経済産業省：「東京電力福島第一原子力発電所の廃炉に向けた中長期ロードマップ」（2019年12月27日）
https://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/pdf/20191227_3.pdf

1. 相対的にリスクが高く、優先順位が高いもの
(建屋内滞留水やプール内燃料)
2. 直ちにリスクとして発現するとは考え難いが、
拙速に対処した場合にはかえってリスクを増加
させ得るもの(燃料デブリ)
3. 将来的にもリスクが大きくなるとは考え難い
が、廃炉工程において適切に対処すべきもの
(汚染装置スラッジなどの固体廃棄物)

しかし、筆者にとってこのような中長期ロードマップやマイルストーンが釈然としないのは、一つ目には、そもそもこのロードマップが目標とする最終状態が示されておらず、二つ目には、ロードマップと称していながら、処理されていく主要項目のシーケンスが、クリティカルパスとして示されていないことによる。

最終状態なきロードマップ

第3期の完了が、「ステップ2の完了から30～40年後」と設定されてはいるのであるが、奇妙なことに、ロードマップが行き着く最終的状态が、どのようなものとなるのか説明されていない。福島第一原子力発電所の廃炉のロードマップなのであるから、本来の意味からすると、敷地の全域か、少なくとも大部分の面積については、無条件解放が原則のはずである。すなわち、廃炉が完了した時点で、その後の土地利用については、人が居住してはならない、畑を作ってはならない、井戸を掘ってはならないといった制約が与えられるべきではない。

しかし、この中長期ロードマップは、その第3期が完了したと宣言された時点でも、明らかにそのような状態には至っていない。依然と敷地内には、大量の使用済燃料が乾式キャスクに入れられて保管され、燃料デブリも同様である。さらに、少なくとも10棟以上の巨大な固体廃棄物貯蔵建屋が、それらの内部に大量の放射性廃棄物を収納したまま残っており、コンクリートの瓦礫や鉄筋、鉄骨などのスクラップも野積みされたままどこかに放置されたままである。

そして、敷地内の放射線レベルが、米国環境保護庁(EPA)の定める40 μ Sv/年や、多くの欧州諸国が定める10 μ Sv/年の基準を満足することもなく、公園やスポーツ施設としても、工業団地としても使用できない。結局そのまま、使用済燃料や放射性廃棄物の処理施設、貯蔵施設となるだけではないかと思われるのだが、これについてロードマップは無言である。

そもそも日本においては、廃炉の最終状態に対する放射線レベルの基準や要件が明確に定められていない。2019年2月に世界原子力協会(WNA)の廃棄物管理・廃炉ワーキング・グループが発行した報告書「原子力施設の廃止措置によって発生する資材と廃棄物を管理するための方法(Methodology to Manage Material and Waste from Nuclear Decommissioning)⁸」の別添資料であるAppendix 2「国による最終状態の要件(National End State Requirements)」においては、ベルギー、カナダ、中国、フランス、ドイツ、イタリア、インド、オランダ、ロシア、スペイン、英国、米国における実態がまとめられているが、日本はこの中に含まれていない。また、これらの国々の中には、ケースバイケースとしている国々も少なくはないが、少なくともベルギー、イタリア、オランダ、英国においては10 μ Sv/年が明記されている。

なお、福島第一原子力発電所の敷地内に保管されている瓦礫や汚染水等から敷地境界に追加的に放出される線量(自然界にもともとあった線量を除いて、新たに放出されて増した分の線量)に対しては、原子力規制委員会が、「年間1mSv未満」に抑えることを求めているが(2012年11月7日付け「特定原子力施設への指定に際し東京電力株式会社福島第一原子力発電所に対して求める措置を講ずべき事項について」、および、2014年2月26日付け「東京電力福島第一原子力発電所敷地境界における実効線量の制限の達成に向けた規制要求について」)、これが廃炉の最終状態に対する要件とは無関係な特別の基準であることを、原子力規制委員会は、誤解を避けるためにも明示すべきである。

8. WNA, "Methodology to Manage Material and Waste from Nuclear Decommissioning Waste Management & Decommissioning Working Group" 2019
<https://www.world-nuclear.org/getmedia/e81d115f-70c2-4c47-b208-242acc799121/methodology-to-manage-material-and-waste-report.pdf.aspx>

クリティカルパスなきマイルストーン

「完了」よりも「着手」を重視したマイルストーンというのも一般的ではないが、掲げられたマイルストーンに、相互関係や順序がないというもの奇妙である。そのため、掲げられた個々のマイルストーンを達成することで、どれだけ第3期の完了に近づいたのかが分からない。SEDによって優先項目を特定するというのは理解できるが、どのような項目が第3期の完了に漕ぎ着けるためのクリティカルパスを構成しているのかも示されるべきである。そして、廃炉工程に

おいては、そのようなクリティカルパス上にある項目の目標完了日がマイルストーンとして示されるべきである。

このように、相互関連の読み取りにくい4つの分野ではあるが、以下では、それぞれにおける潜在的な問題点について詳しく議論する。

2.1. 汚染水対策

汚染水発生の背景と状況

汚染水の増加は、建屋から汲み上げられる水量から、原子炉の冷却用に再循環される水量の差である。建屋内に流入する地下水や雨水の量がゼロであるならば、両者は等しくなるはずなのだが、実際にはこれらが大量に流入し続け、再循環に使われる水量を上回っていることから、処理されなければならない汚染水が日々増加し続けている。

この問題の対策の一つとして打ち出されたのが凍土壁の建設で、2013年の提案を東京電力と鹿島建設が同年11月までに計画にまとめ、実行へと進んだ。当時は、これが完成することで、外部からの地下水流は、ほとんど遮断されるとのことであったが、土木工学の専門家の間では、そのような楽観的な推測を強く疑い、破碎した地下からの噴出が至るところで発生し、効果が期待できないだろうとの意見もあった。しかし結局、凍土壁の建設には345億円が投じられ、2017年8月までに凍結を終えたとのことで、完成が宣言させられた。1～4号機の建屋の周囲1.5kmに対して、1,500本の凍結管を地下30mの深さまで打ち込んで囲み、それぞれの中に -30°C の冷却液を流し、土壌の水分を凍結させて壁を作った。

東京電力は、2017年の完成後に迎えた冬季の3カ月平均の地下水流入量は110トン/日となり、2015年の同じ時期の流入量490トン/日と比べると380トン/日も減少したと主張したが、これには雨水の浸透を防ぐための敷地の舗装や、地下水を汲み上げるために設置した井戸の効果も含まれており、凍土壁だけの効果としては95トン/日との評価を示した。一方、2018年3月にロイターが発表した独自のデータ

の分析によれば、流入量は141トン/日で、それ以前の9カ月平均である132トン/日よりむしろ増えているとのことで、東京電力による説明には納得していない。

そもそも流入量は、降雨量に大きく左右される。雨が少ない2018年1月は83トン/日だったが、2017年10月20～26日の台風があった週には、866トン/日にまで急増していたのである。そして、このような傾向はその後も続いた。2019年10月24～30日の1週間における建屋への地下水・雨水等の流入量が、日平均で505 m^3 /日、地下水ドレン・ウェルから建屋への移送量が132 m^3 /日で、合計637 m^3 /日であった。一方、この1週間における降雨量は、158mmであった。ここでの「地下水ドレン・ウェルからの建屋への移送量」とは、海側凍土壁の外側にある4m盤に設けられた汲み上げ施設で、凍土壁の外側ではあるが、汚染を含んでいることから敢えてポンプでタービン建屋に移送される水量のことである。同じ傾向は2020年になっても引き続き観測され、降雨の続いた7月2～8日の1週間には、それぞれ360 m^3 /日、7 m^3 /日、合計367 m^3 /日、降水量が145mm/週であったが、降雨のなかった11月26日～12月2日の1週間には、それぞれ131 m^3 /日、6 m^3 /日、合計137 m^3 /日であった。

以上のように、タービン建屋への汚染水の流入は、凍土壁の完成が宣言された2017年から3年以上を経てもなお続いており、「2025年内に汚染水発生量を100 m^3 /日以下に抑制」とのマイルストーンが掲げられてはいるが、そのための具体的な方法があるわけではなく、2020年10月6日に発行されたNDFの「技術戦略プラン2020」も無言である。

このような無策なままでのマイルストーンの提示では、達成を確約することができない。筆者は、2013年10月、IRIDに提出した「フクシマ・クロージャー・プラン」の中で、凍土壁では十分な遮水能力が期待できないことを述べ、より確実な方法として、敷地全体を取り囲む海面よりも深く掘り下げた総長約7kmの濠を建設する概念（ドライ・アイランド）を提案していた。（下図）

この案は、単に汚染水対策としてだけではなく、恒久的で広大なドライ・アイランドを人工的に造成することで、放射性廃棄物を埋設処理することが可能なトレンチを設け、燃料デブリを回収するためのホットセルを地下に設置するための環境作りも兼ね、かつ、より堅牢なセキュリティ強化も考慮したもので、中世の築城にも取り入れられた実績がある。今からでも採用するのが手遅れだとは思わないが、巨額を凍土壁に投じてしまった後の議論としては、かなり戸惑いもあるだろう。

では、今の凍土壁のまま、汚染水の発生を確実に減少させる具体的な効果的方法があるだろうか。燃料

デブリの冷却を水冷から空冷に替えれば、冷却水が燃料デブリから放射性物質を抽出しなくなり、タービン建屋に持ち込まれる放射性物質のインベントリーは、周囲の土壤に含まれる残留放射性物質が地下水に溶けて持ち込まれるだけになる。そして、その濃度は次第に低下していく。十分低下するまでにどれほどの時間が必要となるかは分からないが、そのようなレベルが安定的に達成できるようになった時点で、タービン建屋からの汲み上げを終わらせることができるものと思われる。それが、マイルストーンとして掲げられた2025年までに達成できる期待もある。そのためにも、燃料デブリの空冷化は、急ぐ必要がある。

しかし、凍土壁には、その建設に巨額を要したが、その維持のためには、設備の運転、監視、点検、メンテナンスのために、今後も年数十億円の費用が発生すると言われている。劣化も遠からず発生するだろう。総合的な価値も考慮し、「濠」の案も含め、長期的な再検討を望みたい。

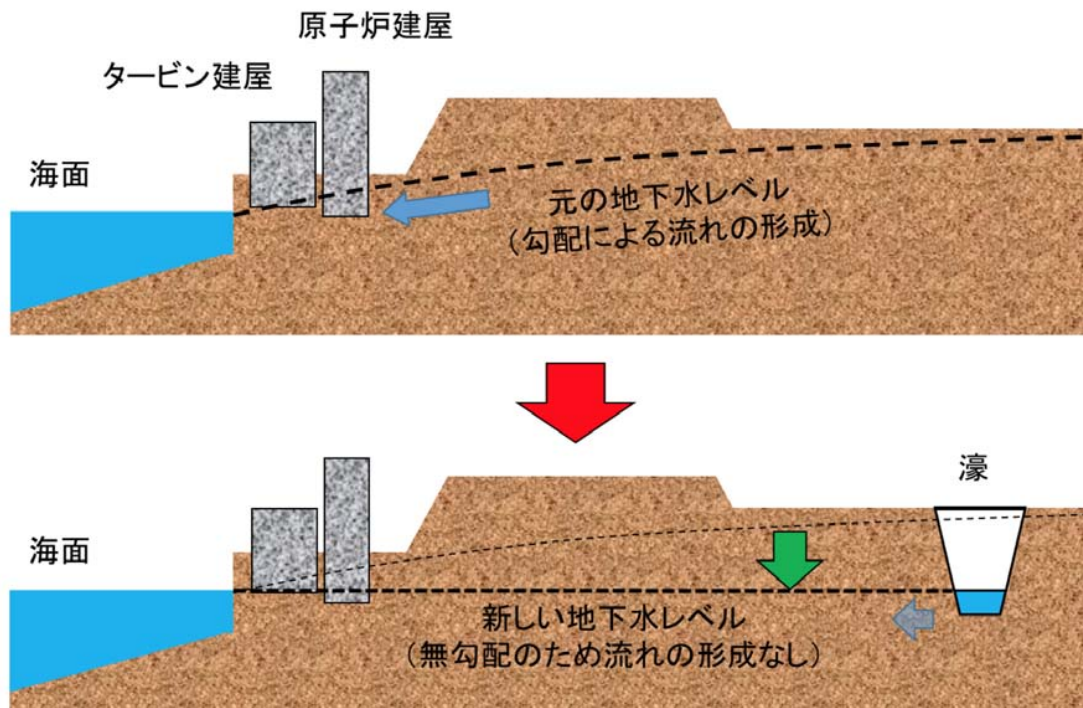


図1：ドライ・アイランド
（出典：筆者）

汚染水の処理と貯蔵の状況

東京電力ホールディングスの処理水ポータルサイト (Treated Water Portal Site) によれば、2020年11月19日現在までの汚染水処理と貯蔵の状況は、以下の通りである。

- ・ 処理水の貯蔵量
1,236,874m³
- ・ 多核種除去設備等 (ALPS) による処理水
1,211,875m³ (993基の貯蔵タンク)
- ・ ストロンチウム処理水
24,999m³ (45基の貯蔵タンク)
- ・ その他
淡水化装置 (RO) 処理水12基、濃縮塩水2基

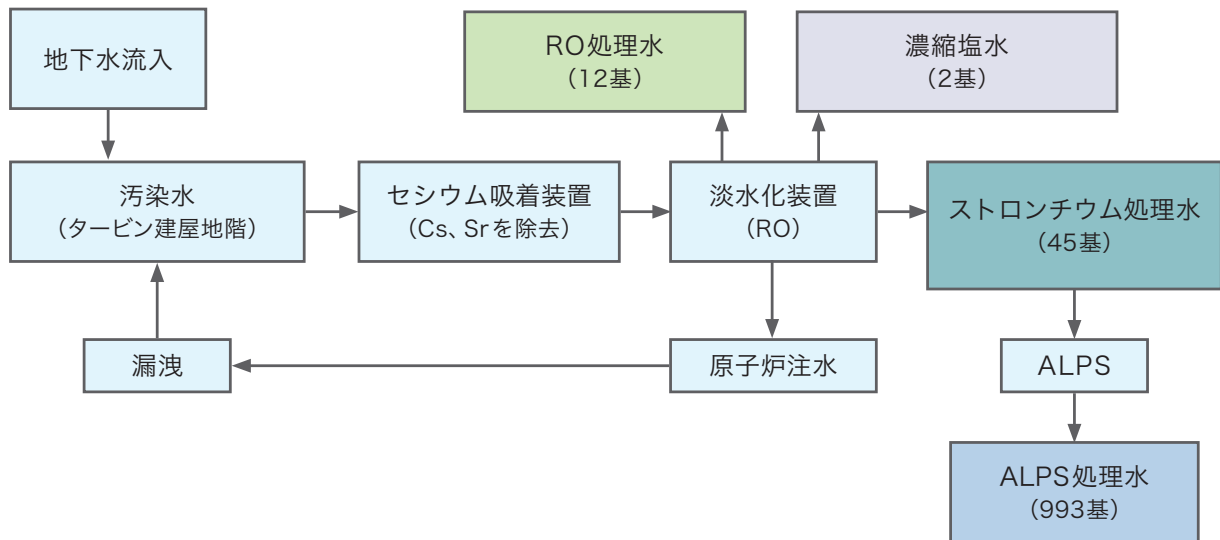


図2：汚染水処理と貯蔵の状況
(出典：筆者)

2020年12月末までのタンク増設によって、約137万m³まで容量を確保できるとのことであるが、これでも2022年夏頃までにはすべてを満水状態にしてしまうと予想されている。ただし、さらに設置場所を確保して、容量を増やそうとの動きもあるようである。

さて、貯蔵量のうち98%を占めるALPS (Advanced Liquid Processing System) による処理水であるが、一般環境への放水許容濃度 (告示濃度比総和が1以下) を満たしていない。そして、その原因は、ALPSによる吸着が原理的に不可能なトリチウムだけによるのではない。すなわち、トリチウムの寄与を仮にまったく除外したとしても、ALPS処理水の貯蔵量が1,122,900m³だった2020年9月30日時点において、放水許容濃度以下なのはたったの27% (295,000m³) だけであった。そして、1~5倍以下が34% (374,100m³)、5~10倍以下が19% (207,000m³)、10~100倍が15% (161,700m³)、100~19,909倍が6% (63,200m³) となっている。

63,200m³の汚染水を仮に放水のために150倍に希釈すると、1億m³に近い水量が必要となり、1,500倍に希釈するには、そのさらに10倍の10億m³もの水量が必要になる。このままでは、仮に認められたとしても、希釈放水さえ解決方法にはならない。

トリチウムの放水許容濃度は60,000Bq/Lであるが、実測値は131,000~2,500,000Bq/Lであり、すべてのタンクが超えている。ストロンチウム (Sr-90) に対する放水許容濃度は30Bq/Lであるが、2013年度に既設ALPSのフィルター不具合により、炭酸塩沈澱スラリーが設備出口に透過したことで、433,000Bq/Lの高濃度を示しているものもある。

経済産業省の「トリチウム水タスクフォース」による2016年6月の報告書では、海洋放出を含めた5つのオプションを提示しているが、未だに決定されてい

ない。風評被害に対する周辺地域の漁業関係者からの強い反対もあるからである。

筆者が「フクシマ・クロージャー・プラン」を書く時にも、この問題はすでに悩ましい問題だった。当時はまだALPSが稼働しておらず、セシウム (Cs) 吸着塔と逆浸透 (RO) 膜装置で処理されただけの、「濃縮塩水タンク」に貯蔵された、高濃度のストロンチウム (Sr)、トリチウム、塩分を含んだ中間処理水が、2013年9月24日時点で、291,000m³の量に達していた。(下図)

筆者は当時、いずれALPSが稼働するようになったとしても、依然トリチウムが除去できないことを踏まえ、処理水にトリチウムだけが残留することを前提条件とし、これを混ぜてコンクリート・ブロックを作ることで消費して、それで濠の擁壁を作ることを提案した。トリチウムは透過力の弱いベータ線だけを放射する特殊な放射性物質であり、このような

用途とすることで、ほとんど無害化することができる。そこで、予想される塩分濃度でもコンクリートが固化するかなどの文献調査も行った。しかし、当時ですでに発生量が多く、4分の1が消費できる程度であったため、残りはどうしても希釈放流に頼らざるを得ないとの結論だった。

汚染水に関しては、このような大量に貯蔵された処理水の最終的な処理方法だけが問題なのではない。水の処理に使用されて発生した二次廃棄物、すなわち、沈澱処理生成物やALPSなどの使用済吸着材が、HIC (High Integrity Container 高性能容器) に入られて保管されているが、これらの保管数量も膨大となり、それらの保管場所の確保も問題になっている。

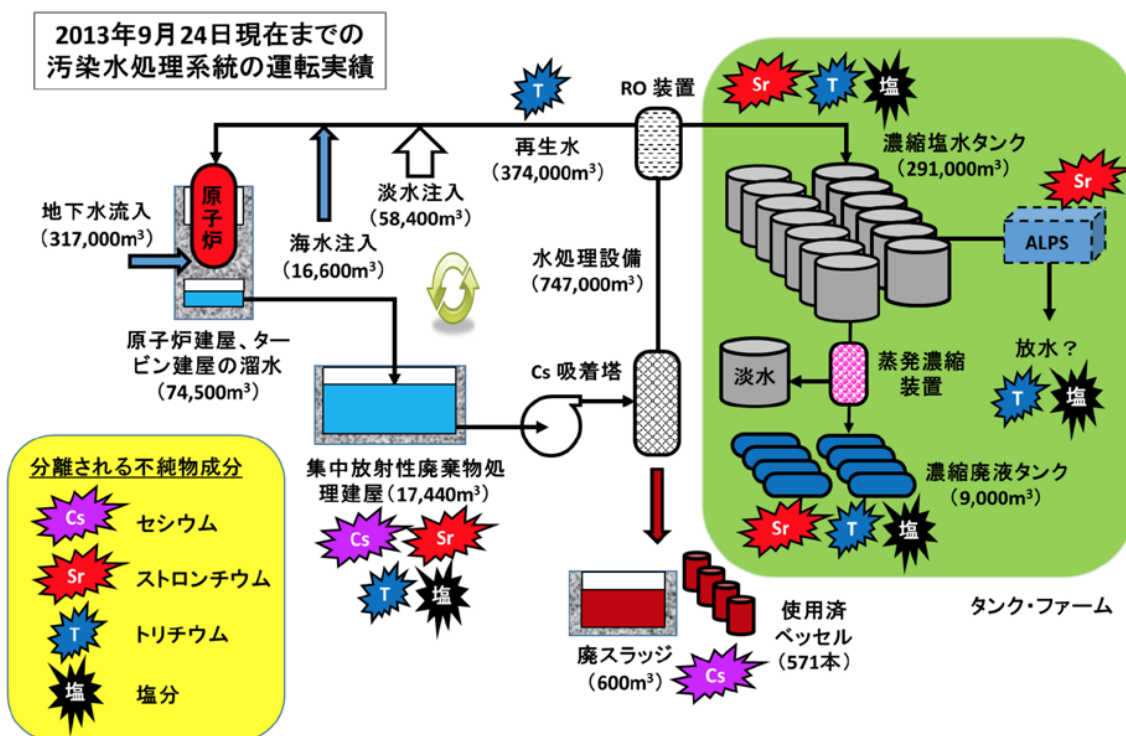


図3：2013年9月24日現在までの汚染水処理システムの運転実績
(出典：筆者)

2.2. 使用済燃料プールからの燃料取り出し

使用済み燃料

事故発生の直前、1号機には、原子炉内に400体、使用済燃料プールには292体の使用済燃料と100体の新燃料があった。2号機にはそれぞれ、548体、587体、28体が、そして3号機にはそれぞれ548体、514体、52体があった。大型改造工事の最中だった4号機の場合、原子炉内にあった燃料は全数取り出されており、使用済燃料プールに保管されていた使用済燃料が1,331体と新燃料が202体であった。したがって、事故によって破損した燃料は、当時1～3号機の原子炉内にあった合計1,496体ということになる。

破損を免れた使用済燃料と新燃料に対しては、その後今日までに、次のように搬出が行われている。まず4号機においては、2013年11月18日から開始され、2014年12月22日までに全数(1,533体)に対して完了した。次に着手されたのが3号機に対してで、2019年4月15日に始まった。その後トラブルによる中断を何度か経ながら、2021年2月28日、ようやく566体のうちの最後のバッチの移動を終えた。1、2号機ではまだ準備に暫く時間を要し、中長期ロードマップによれば、2号機(合計615体)で始まるのが2024～2026年頃、1号機(合計392体)では2027～2028年頃とのことである。

ちなみに、2018年10月2日付の「福島第一原子力発電所の廃炉のための技術戦略プラン2018について」によれば、使用済燃料プールからの搬出作業の開始は、3号機においては2018年度中頃から、1、2号機においては2023年度を目処としており、1、2号機の予定が、わずか2年の間にかなり後退したことになる。

さて、同じ福島第一原子力発電所内にあり、事故による直接的な影響を免れた5、6号機の場合も、その後廃炉が決定され、現在、原子炉内の燃料はすべて使用済燃料プールに移動されている。その結果、5号機の使用済燃料プール内には、1,374体の使用済燃料と168体の新燃料が保管されている。6号機の場合、使用済燃料プール内に保管されている1,456体の使用済燃料と198体の新燃料の他、230体の新燃料が新燃料貯蔵庫に保管されたままとされている。

これらに対する搬出が手掛けられるのは、1号機の搬出を終えてからということになる。

搬出された使用済燃料と新燃料の大部分は、同じ敷地内にある共用プールに移されており、同プール内には、それまでに保管されていた使用済燃料も含め、2020年9月末時点で、使用済燃料6,365体、新燃料76体が保管されている。他にキャスク詰めによって仮保管されている使用済燃料が1～6号機からの分をすべて合計して2,033体ある。したがって、福島第一原子力発電所内には、事故で破損した1～3号機の原子炉にあった1,496体を除くと、合計13,137体の使用済燃料と新燃料が、使用済燃料プール、新燃料貯蔵庫、共用プール、乾式キャスクに分散されて保管されていることになる。

東京電力によれば、使用済燃料は、ゆくゆく乾式キャスクに装荷し、約21,000m²の一時保管施設に保管する計画である。なお、1～3号機の燃料デブリに対しては、約60,000m²の広大な面積がその一時保管施設用として充てられる計画である。

福島第一原子力発電所における燃料の処理に関する問題は、マイルストーンとして掲げた使用済燃料プールからの取り出しよりもむしろ、その後の工程において現れる可能性がある。

事故対応時の劣化・損傷の可能性

使用済燃料は、原子炉建屋にある使用済燃料プールから共用プールに移動するときには輸送キャスクが用いられるが、共用プールから取り出して気中に保管するときには乾式キャスクに装荷するのであるが、両キャスクには、構造上と取り扱い上の大きな違いがある。乾式キャスクの場合、使用済燃料を収納したキャニスターは、小さな貫通孔のある大きな上蓋を溶接後、貫通孔から内部の水を抜き、真空引きして乾燥後、ヘリウムを加圧充填し、当該の貫通孔に蓋を溶接して密封状態を完成する。この際、燃料被覆管に小さな欠陥があると、真空引きの際に被覆管内部の放射性物質(Kr-85)が外部に引き出されることになる。

3号機と4号機の事故では、使用済燃料プールの水位が著しく低下し、大量の海水が散水、注水されており

燃料被覆管に塩分が析出し、その後は長い期間塩分を含んだ水に浸されており、劣化が生じていた可能性がある。そして、事故の際に上から落下してきたコンクリート瓦礫によって損傷を受けていた可能性もある。しかし、輸送キャスクに装荷する際には、一体ずつ健全性を点検したわけではなく、その必要もなかった。しかし、保管のために乾式キャスクのキャニスターに密封する際には、真空引きの工程があるため、燃料被覆管に小さな欠陥が生じていることで、内部の放射性物質が引き出されたり、所定の真空度に達するまでに長時間を要したりなど、作業が影響を受ける可能性があることから、そのような確認や検査の必要がある。

このような問題は、キャニスターに装荷する前、個々の燃料集合体に対して、特殊な燃料検査（バキューム・シッピング）を実施することで回避可能であるが、これには長い時間を要することになり、また、そのような欠陥を有する燃料集合体が多数確認された場合のために、安全な取り扱い方法を別途定めておく必要がある。燃料被覆管は、長期間にわたる日々の温度変化を経験することによって、金属学的な劣化を呈することが知られている。これは、ジルカロイ製の被覆管内で、元々周方向に向いていた水素化物の結晶が、径方向に向きを変えることで生じるもので、フープ応力に対する機械的強度が低下する。この現象を、長期間曝露されていた塩水という厳し

い環境と組み合わせて考慮すると、長期間の保管においては、どのような潜在的な相乗効果が表れてくるのか不明である。したがって、どの途バキューム・シッピングの実施は不可欠である。

乾式貯蔵の長期化、無期限化

最終的に13,000体もの使用済燃料が乾式キャスクに収納され、福島第一原子力発電所内に保管されたとして、その後、どれほどの期間にわたって保管が続くことになるのか。何が解決されることによって、保管を終えることができるのか。これらに対する答えは、日本のバックエンド政策と技術が確定し、それらが安定的に実行に移されていて初めて与えられることになるのだが、今はまだない。

しかしその間、21,000m²の面積に、200基ほどもある乾式キャスクに使用済燃料を集中させて保管し続けることが、たとえNDAによるSEDの概念に適用したとしても、セキュリティ上、かなり厳重な防衛体制が伴わない限り、容易に国民の賛意を得ることができるとは考え難い。この問題の扱いは、NDFの裁量権をはるかに超えるものであることが明らかであり、経産省のみで決定できることでもない。関係省庁間でもっとしっかりとした議論が必要なはずである。

2.3. 燃料デブリ取り出し

2.3.1 全般

政府の中長期ロードマップとNDFの技術戦略プランによれば、NDAのSEDに基づいて抽出された優先的に取り組むべきリスク低減における基本的な考え方は、以下の点である。

1. **安全**：放射性物質によるリスクの低減ならびに労働安全の確保
2. **確実**：信頼性が高く、柔軟性のある技術
3. **合理性**：リソース（ヒト、モノ、カネ、スペース等）の有効利用
4. **迅速**：時間軸の意識
5. **現物指向**：徹底的な三現（現場、現物、現実）主義

その上で、具体的な工法を立案する際に考慮すべき特殊性としては、以下を掲げており、ここでの燃料デブリの取り出しに対しても、これらが考慮されているとのことである。

- ・ 大量の放射性物質が、内部被曝に大きな影響をもつα核種を含め、通常にないさまざまな形態（非定型）で非密封状態にあること
- ・ 原子炉建屋、PCVといった放射性物質を閉じ込める障壁が完全でないこと
- ・ これらの放射性物質や閉じ込め障壁の状況等に大きな不確かさがあること
- ・ 現場の放射線レベルが高い等の制約から現場へのアクセスや現場情報を得るための計装装置の設置が困難であること

- ・ 現状の放射線レベルが高く、さらには閉じ込め障壁等のさらなる劣化が懸念されることから廃炉を長期化させない、時間軸を意識した対応が必要なこと

燃料デブリ取り出しのためのアクセス経路

燃料デブリの大部分は、原子炉圧力容器底部を貫通してペDESTALの内側に崩落し、その後行われた注水によって、現在に至るまで冠水して冷却されている。ペDESTALとは、原子炉圧力容器を格納容器底部の中心に設置する厚い円筒形の台座のことであり、丈夫な鉄筋コンクリート製である。2、3号機の場合、内径が約5.4mで、1号機よりも1mほど大きい。

ペDESTALの内側には、旋回式のプラットフォームが設置され、定期的にメンテナンスを行う制御棒駆動機構（CRD）や中性子検出器の信号ケーブルを脱着する際の作業架台となっている。ペDESTALの底面から同プラットフォームの面までは、高さ約3.2mである。燃料デブリの取り出しには、このペDESTAL内側へのアクセスが不可欠となる。

1～3号機の原子炉圧力容器と格納容器から燃料デブリを回収する計画を立案するにあたっては、事故進展の違いから、現状における燃料デブリの分布状態、格納容器内の水位、X-6ペネからのアクセス性とその周辺の放射線環境が、それぞれにおいて異なることが考慮されている。

ここで、燃料デブリの分布状態のうち、原子炉圧力容器内の炉心部と炉底部については、解像度が十分に良好とは言えないものの、ミュオン透過法測定装置による撮影結果も貴重な情報となっている。1号機においては2015年2～5月と5～9月に、2号機においては2016年3～7月に、3号機においては2017年5～9月にそれぞれ撮影を実施している。

また、「X-6ペネ」とは、前述のCRDをメンテナンスのために格納容器内から専用の容器とカートを使って外に搬出し、メンテナンスを終えたCRDを戻すために搬入するための開口部であり、内部にはその作業のためのレールが敷設され、その先は、ペDESTAL内に入るための四角形の貫通孔に通じている。同ペネは定期検査時においてのみ当該作業のために開放されるが、プラント運転時には閉止されている。しかし、これを開放するならば、格納容器の外側から直

接ペDESTAL内にアクセスする最短経路が確保されることになる。

なお、ペDESTALには、この小さな四角形の開口部の他にも、作業者が入退するための大きなドアサイズのアクセス口が底部に設けられ、そこからドライウエル底部に連絡している。また、ペDESTAL内の床面には、2つのドレン・サンプ（一つが機器ドレン用で他が床ドレン用）が設置されている。

ペDESTAL内調査

ペDESTAL内に崩落した燃料デブリの状態に対する調査は、1号機に対してはこれまでのところまだ実現しておらず、2号機に対しては3回（2017年1月、2018年1月、2019年2月）実施され、3号機に対しては1回（2017年7月）実施されている。

3号機に対する2017年7月の調査では、小石状、砂状、塊状の堆積物に混じって、燃料集合体の上部タイププレート、CRDインデックス・チューブ、CRD案内管、制御棒下部の落下速度リミッターの鋳物部材などの炉内構造物の他、グレーチングなどの落下物も複数確認されている。

2号機に対する調査は最も詳細に実施されており、2018年1月の調査では、ペDESTAL底部の小石状、粘土状の堆積物に混じって、燃料集合体の上部タイププレートが埋没している状態が確認されている。燃料のものか中性子検出器（SRNM）のものか特定できないが、スプリングも確認されている。ケーブル・トレイやCRD交換機昇降台車のグレーチングなどの構造物が破損、変形して乱雑に散乱しているようすも観察された。このときには、プラットフォームの上面から約2m下まで垂直に調査ユニットを下ろし、詳細な観察が行われた。カラー画像で、かなり鮮明である。2019年2月には、フィンガ付きの把持装置を使って接触調査が行われ、小さな小石状の堆積物は比較的容易に動かすことができるが、大きな岩状に固まった塊は動かすことができず、接触痕も確認されなかったと報告されている。このとき測定されたペDESTAL内の放射線量率は6.4～7.6 Gy/hで、場所によらずほぼ一定だったが、ペDESTAL外側の放射線量率は43 Gy/hで、内側よりも高かった。この結果は予想と反するものであり、理由の説明が与えられてはいないが、筆者の推測するところによれば、ペDESTALの内側の放射線量率が外側に比べて顕著に低いのは、

内側の燃料デブリが水に浸かっていることで、ベータ線がほぼ完全に遮蔽されてしまっていることによるものである。しかしこのことは、一旦注水が停止されて燃料デブリが乾燥した場合に、大幅に放射線量が上昇する可能性を示唆する。

気中一横アクセス工法

NDFの技術戦略プランで、燃料デブリの回収方法として、原子炉建屋1階からの「気中一横アクセス工法」に絞り込まれたのは、2018年10月2日に発行された版においてであった。ただしこれは、筆者の印象としては、とにかくペDESTAL内部に手を伸ばし、少量でも燃料デブリのサンプルを採取することができればよいというものと思われ、最終的に燃料デブリが残留している部位の隅々から掻き出すことを考慮したものではなく、筆者が「フクシマ・クロージャー・プラン」で提案したペDESTALの真下からのアクセスよりも非現実的であり、実現のためには、関節数と自由度の多い、高度なロボット・アームが必要になるだろうと思ったものである。

号機間の差異とパイロット試験の候補

号機間の事故進展の差異は、各原子炉のスクラム停止から、1号機においては非常用復水器（IC）、2、3号機においては原子炉隔離時冷却系（RCIC）による炉心冷却機能を喪失するまでの時間の長さによる。最も早かったのが1号機で、次に3号機、最も遅かったのが2号機であった。そのため、1号機の燃料デブリは、原子炉圧力容器の底部にはごく少量が残っているだけで、大部分がペDESTAL内に崩落しており、その後底部のアクセス口から大量に溢れ出して、ドライウェル底面に広がったと推定されている。3号機の場合には、原子炉圧力容器の底部にも燃料デブリの一部が流出しないで残り、ペDESTAL内に崩落した分が減ったため、底部のアクセス口からドライウェル底面への流出も少なかったと推定されている。そして2号機の場合には、かなり多くの燃料デブリが原子炉圧力容器の底部に残留したままとなっていて、ペDESTAL内に崩落した分はそのまま留まってドライウェル底面への流出はなかったと推定されている。

格納容器内の水位は、事故による格納容器の損傷規模による。1号機の場合、測定の結果、ドライウェル

底面から約2mで、X-6ペネは水没を免れている。トールスはほぼ水没状態と推定されている。3号機のドライウェル内水位は、底面から約6mで、X-6ペネは水没している。トールスはほぼ水没状態と推定されている。2号機の格納容器は、事故が進展していく中で圧力が急速に低下し、大規模な損傷が起こったものと考えられている。ドライウェル内水位は、トールスに繋がるベント管の下端で、床面から約20cmであり、X-6ペネは水没していない。トールス内水位は、損傷によって大きく低下し、ダウンカマーの下端が水没しておらず、ドライウェルとトールスの気相が連通している可能性がある。

「気中一横アクセス工法」を採用する場合の主要な作業場所となる原子炉建屋1階は、1号機においては高線量で、特にX-6ペネの周辺は著しく（630 mSv/h）作業場所には適さない。3号機においても数10mSv/hの箇所がある。ある程度の除染や遮蔽を施した程度では、作業者が効率的な作業を行えるほどの環境にはならない。2号機においてのみ、原子炉建屋1階の放射線レベルがほぼ全域にわたって5mSv/hにまで低下しており、通常であれば、これでも十分低いとは到底言えないところではあるのだが、どうやらNDFは、それでも小規模なパイロット試験であれば可能と考えたようである。

そのような状況から、燃料デブリ採取のパイロット試験は、最も好条件で難度の低い2号機で実施されることとなり、1、3号機に対しては、さらなる状況調査が続行されることになった。そのため、2号機におけるパイロット試験の成功が、そのまま1、3号機に対しても適用可能である保証はない。さらに言えば、パイロット試験の工法を、その後の本格的な作業規模として採用できるのかどうかも未知である。

2.3.2 2号機

1～3号機の中では最も好条件で、燃料デブリのサンプル採取だけに関しては最も難度が低いと思われる2号機の場合、その準備の進展に関する最新情報は、東京電力ホールディングス（株）が2020年10月29日に発表した「2号機 PCV内部調査及び試験的取り出しの準備状況」に、以下の内容がまとめられている。

これまでの進捗と今後の予定

2号機においては、X-6ペネの使用可否を見極めるため、2017年1月にその内部を観察し、堆積物の存在を確認していた。そこで、その性状を詳細に調査するため、当該堆積物の除去手順を検討した。そこでさっそく2017年の調査では、X-6ペネに小さな貫通孔を設け、これにガイドパイプを挿入して調査ユニットを入れ、堆積物の状態について調査を行った。

2020年10月28日、堆積物に対する接触調査を実施した結果、接触によって形状が変化すること、すなわち固着しているわけではないことが確認された。そして、内部のケーブルも固着しておらず、調査装置を使って持ち上げることができることも確認した。この調査に用いた接触調査ユニットは、複数の関節を有し、照明と3本指の付いた装置であった。なお、この日の作業では、調査ユニットを設置するなどの作業で、作業員の一人が、最高1.5mSvの被曝をしている。

今後行われる予定のX-6ペネ内の堆積物を除去するための作業では、放射性ダストの発生が伴うと予想されるため、X-6ペネの上の近傍にあるX-53ペネにスプレー治具を取り付ける計画を立てている。X-53ペネには、内径50mmの既設孔があるのだが、スプレー治具は外径100mmであるため、同ペネを130mmに拡大する計画である。この穴の拡大作業にはホールソーが使われる。こうしてX-53ペネにスプレー治具を設定し、スプレーカーテンを作った上で、X-6ペネの堆積物の除去が行われることになる。

燃料デブリの回収

X-53ペネにスプレー治具を設定する作業は、2021年に入ってから実施される予定である。その後、隔離部屋を設置し、X-6ペネ内部の調査、堆積物の撤去、そしてようやく燃料デブリの試験取り出し作業へと進んでいく。

本格的な作業規模として燃料デブリの回収が行われるのは、それからまだかなり先のことである。したがって、X-6ペネ内部の堆積物に対して調査を行うだけで、一人の作業員に1.5mSvもの被曝が発生したことや、そのような堆積物の撤去のためだけでもスプレーカーテンが必要であるというのは、前途に対して大きな困難と不安を感じさせるものである。

実際、以上の進捗状況と計画は、NDFが2018年10月2日付で発行した技術戦略プラン2018にあるものと比較をすると、遅れと修正が見受けられる。同技術戦略プランでは、接触調査は2018年度下期に実施し、2019年度下期にはペDESTAL内部の堆積物のサンプリングが行われるはずであった。そして2020年度にはより採取量を増やしたサンプリングを繰返し、2021年度からは、X-6ペネを拡張改造し、レーン付アーム型取り出し装置を設置しての本格的な燃料デブリ取り出しを開始するとの計画が述べられていた。

2.3.3 3号機

3号機の場合、燃料デブリを回収するアクセス経路の候補であるX-6ペネが完全に水没しているため、ペDESTAL内部の状況を把握するための調査は、2017年7月、その上にあるX-53ペネを使い、ここから水中ROVを投入して行っている。映像を元に三次元復元をして、ペDESTAL内部全体の状況を復元しようと試みたが、撮影時間が短く、画像も不鮮明で部分的であることから被写体が特定できず、位置の推定もできないため、復元されていないものが多い。

その後、ペDESTAL内部に対してだけでなく、3号機の格納容器内に対する調査は、まったく実施されていない。したがって、燃料デブリの回収計画は、まだ立案の段階にさえ至っていない。

2.3.4 1号機

初期対応に重大なミスがあり、それをきっかけに事故の進展が最も急速だった1号機では、前述のように、燃料デブリのほとんどがペDESTAL内に崩落し、原子炉圧力容器の底部には、ごく少量が残っているだけと推定されている。この推定は、前述のミュオン透過法による撮影の結果によっても裏付けられている。また、ペDESTAL内に崩落した燃料デブリは、底部の作業員アクセス口から外側に流出し、ドライウェル底部にまで拡大しているものと推測されている。そして、そのような推定状況を裏付けるかのように、原子炉建屋1階のX-6ペネ周辺の放射線レベルは著しく高く、630mSv/hにも達しており、同ペネを経由しての内部調査は困難と判断され、代わりに

X-2ペネ（所員用エアロックの二重扉がある貫通部）が格納容器へのアクセス経路の候補として選ばれている。

1号機のX-2ペネは270°の方位にあり、X-6ペネの方位（～160°）とは大きく位置が離れているため、X-2ペネからのアクセスによって、その周辺の格納容器内部の状況が分かったとしても、将来の燃料デブリ回収のために、ペDESTAL内へアクセスする経路を確保することには、直接繋がらない。

これまでの進捗と今後の予定

東京電力ホールディングス（株）による「1号機PCV内部調査にかかる干渉物切断作業の状況」（2020年10月29日）によれば、格納容器の内部を調査するために必要な調査装置を入れるため、X-2ペネ（所員用エアロック）の外扉と内扉を切削し、内部の干渉物を撤去する必要がある。一式の装置は、外側から内側に向け、ケーブルドラム、シールドボックス、隔離弁、接続管、ガイドパイプ、インストール装置、調査装置で構成され、X-2ペネの外扉と内扉の間をガイドパイプが貫通している。

実際の作業は、2019年4月8日に着手し、同年6月4日からは、内扉に対し、研磨材を混入させた高圧水の噴射（AWJ）によって直径210mmの穿孔を開始した。その際、格納容器内の気中放射性物質濃度が、作業管理値である $1.7 \times 10^{-2} \text{Bq/cm}^3$ に達したため、その後の切削作業は放射性物質濃度の監視を行いつつ進め、ようやく2020年4月22日までに内扉の切削を完了した。引き続いて8月25日には、干渉物であるグレーチング床を切断し、9月4日にはその下にある鋼材もAWJで切断しようと試みたが、その最中に研磨材の供給部に不具合が発生して作業が中断した。そして、9月29日に再開に漕ぎ着けたものではあったが、切断予定部の近傍に原子炉再循環系の計装配管があることが確認されたことから、再び中断を余儀なくされ、結局、切断箇所を変更することにし、別の鋼材、電線管、手摺などを順次切り落とし、洗浄も行いながら進める予定に変更した。

これらの作業が完了したところで、X-2ペネのエアロックには、ガイドパイプを3カ所に設置し、それらを使って遠隔操作カメラ（ROV）を備えたPCV内部調査装置による調査を行う予定である。

2018年10月2日付のNDFの技術戦略プランによれば、ペDESTAL外部の構造物や堆積物の分布の調査とサンプリングが、2019年度上期から行われることになっており、以上の進捗と今後の予定には、その後生じた遅れと計画の変更が反映されている。

燃料デブリの回収

以上のように、1号機においては、燃料デブリの回収作業への着手は、少なくとも当面、X-6ペネの使用さえその可能性に見通しが立っておらず、X-2ペネからのアクセスによる格納容器内の調査もまだ始まってさえいない。燃料デブリは、少量とは言え原子炉圧力容器内に残っていて、かなりの量がペDESTAL底部のアクセス口からドライウェル底部に拡大していると予想されており、そのように広範囲に、複雑に分布している部位の隅々にまでアクセスして回収する工法として、果たしてロボット・アームによる「気中一横アクセス工法」が適用可能なのか、可能であったとしても最適なのかについて疑念がある。

特に、1号機の場合には、原子炉圧力容器の底部の損傷がかなり早い時期に起こり、何ら効果的な注水ができないうちに進行した。そのため、ペDESTAL内に溶け落ちた高温の燃料デブリは、床面にある2つのドレン・サンプを満たし、さらに下方に向かって深くコンクリートを侵食したものと思われる。気中一横アクセス法では、そのような部位へのアクセスは、著しく困難であるように思われる。

2.3.5 頓挫が懸念されるプランB

筆者が2013年10月にIRIDに提出した「フクシマ・クロージャー・プラン」では、汚染水対策としては、敷地の周囲を濠で巡らしドライ・アイランド化すること、燃料デブリの冷却方法としては、水冷から空冷に切り替えること、燃料デブリの回収方法としては、地下にホットセルを設置して、ペDESTALや原子炉圧力容器の内部に、それらの中心軸に沿って真上に向かってアクセスする工法のセットを提案した。回収装置はホットセル内に設置されるが、その操作は、ホットセルの外側に設置されたワークステーションにいる操作員によって完全にリモートで行われる。ホットセルの外側の作業エリアにおける放射線環境は、原子炉建屋に比べてはるかに良好であり、

作業従事者は、放射線被曝を理由に作業時間を短縮する必要がなく、汚染の付着を防ぐための防護衣や高濃度の放射性物質を吸い込むことを防ぐための保護マスクを着用することも不要である。(それぞれについて下図参照)

これに対して東京電力を中心とするNDFが今日まで進めてきた案は、2018年になって漸く、従来目指していた「冠水-上アクセス工法」を断念し、「気中-横アクセス工法」に切り替える決定はしたものの、汚染水対策としての凍土壁はその遮水能力が期待に満たないままである。燃料デブリの放つ崩壊熱を除去するための注水は、依然と続けられている。

しかし、このような注水が、建屋への地下水の漏洩と組み合わせられることで、延々と増え続ける汚染水問題の根本原因となっているのである。注水が汚染水問題の根本原因の一つであることは、NDFも当然認識しているはずなのではあるが、この問題に真剣に向き合うことを避け続け、燃料デブリの冷却方法について、水冷を続けるべきか空冷に切り替えるべきか、今になってもまだ方針を決めかねている。さらに、燃料デブリ回収の「気中-横アクセス工法」についても、大きな困難が予想される。したがって、筆者は先にそれらの組合せを「プランB」と称したものの、実はこのように、個々の要素自体が、かなり未熟なままで固まっていないのが実情である。

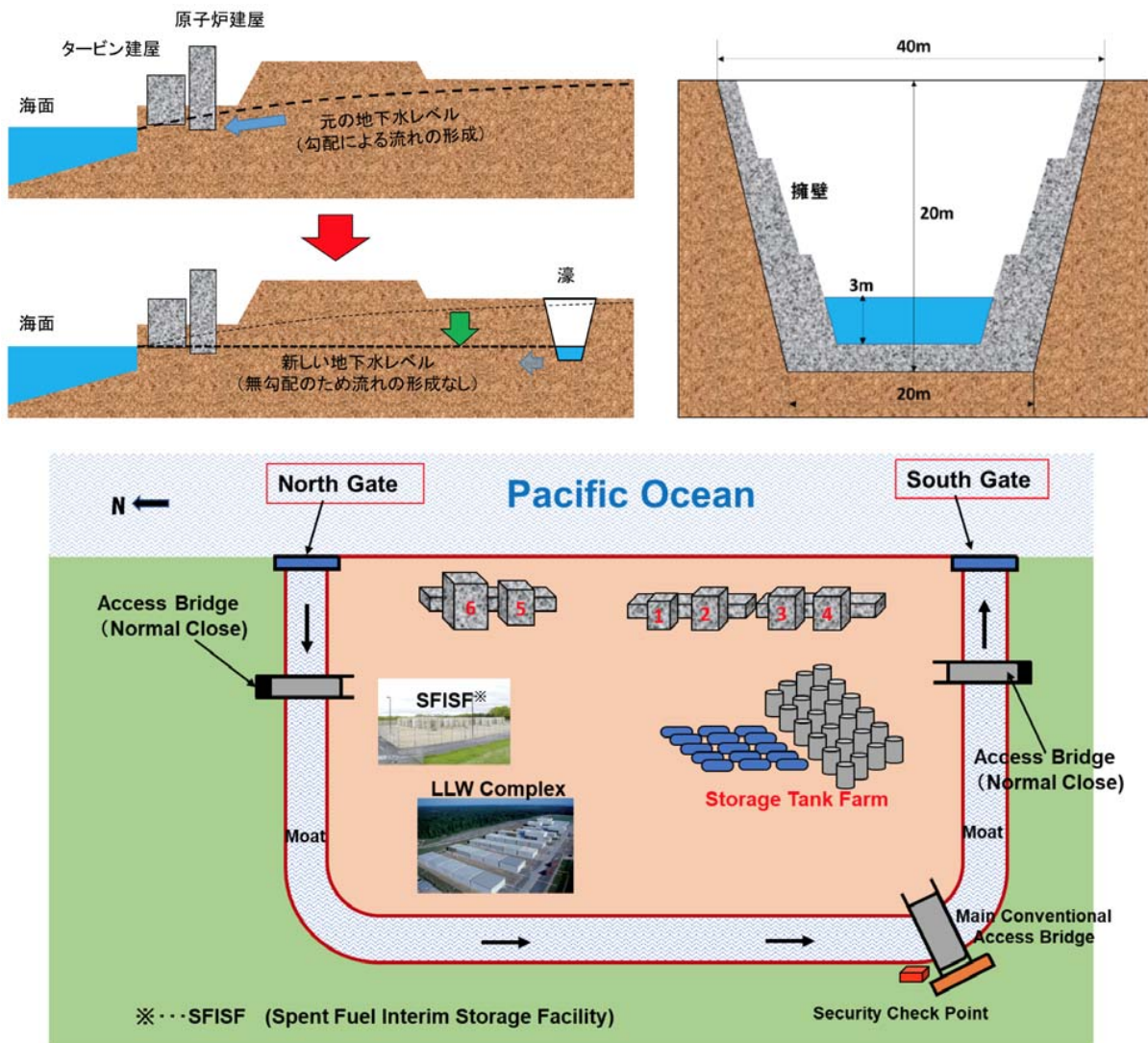


図4：「フクシマ・クロージャー・プラン」において提案した濠の概念
(出典：筆者)

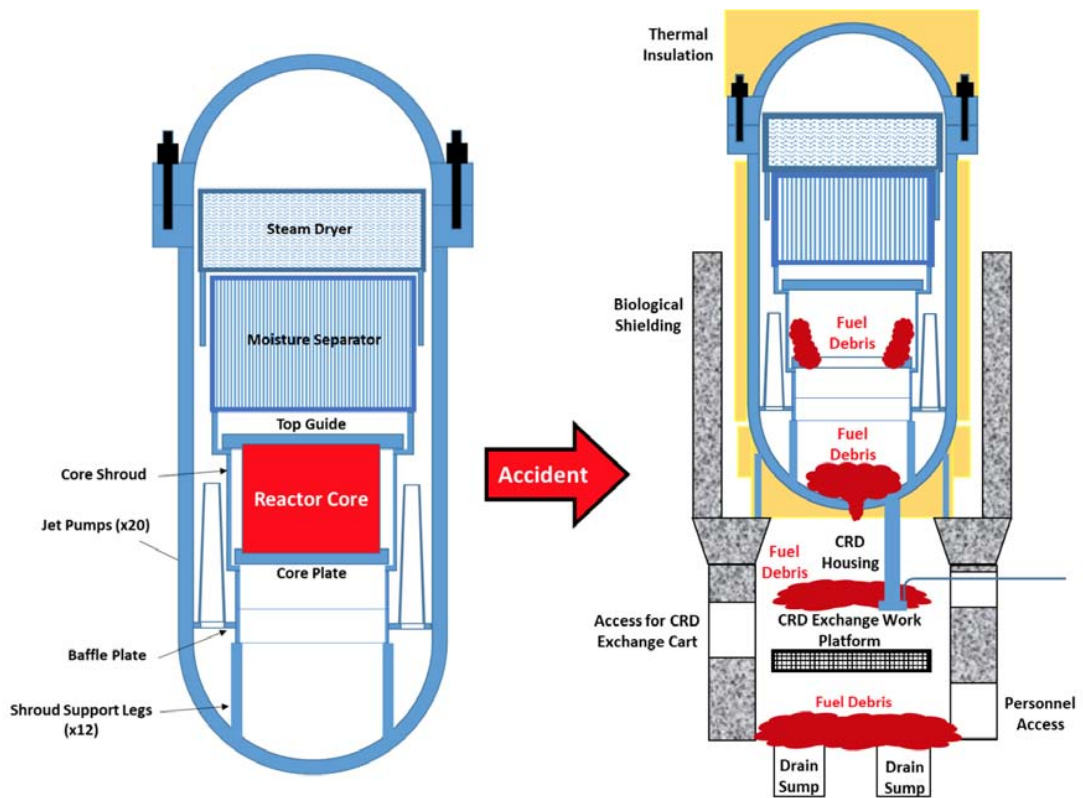


図5：「フクシマ・クロージャー・プラン」において想定した燃料デブリの分布
 (出典：筆者)

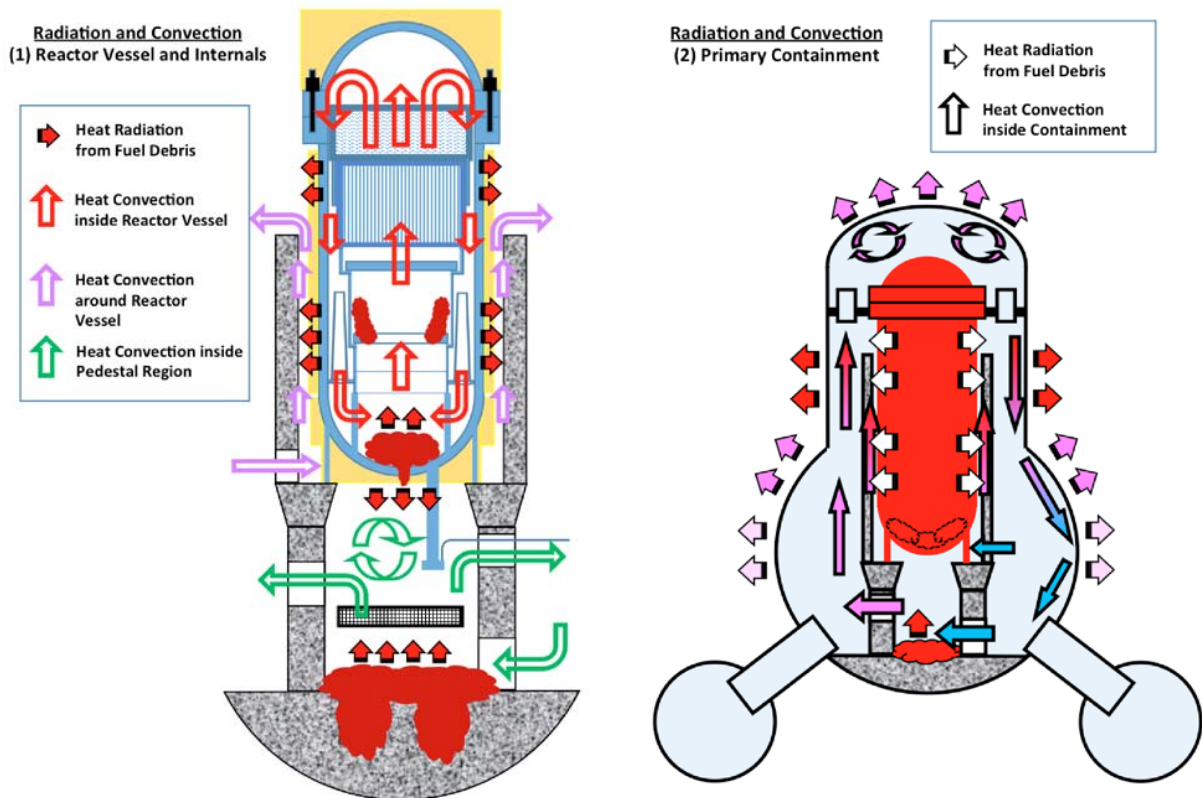


図6：「フクシマ・クロージャー・プラン」において考慮した熱対流、熱輻射
 (出典：筆者)

Radiation and Conduction to Massive Heat Sink

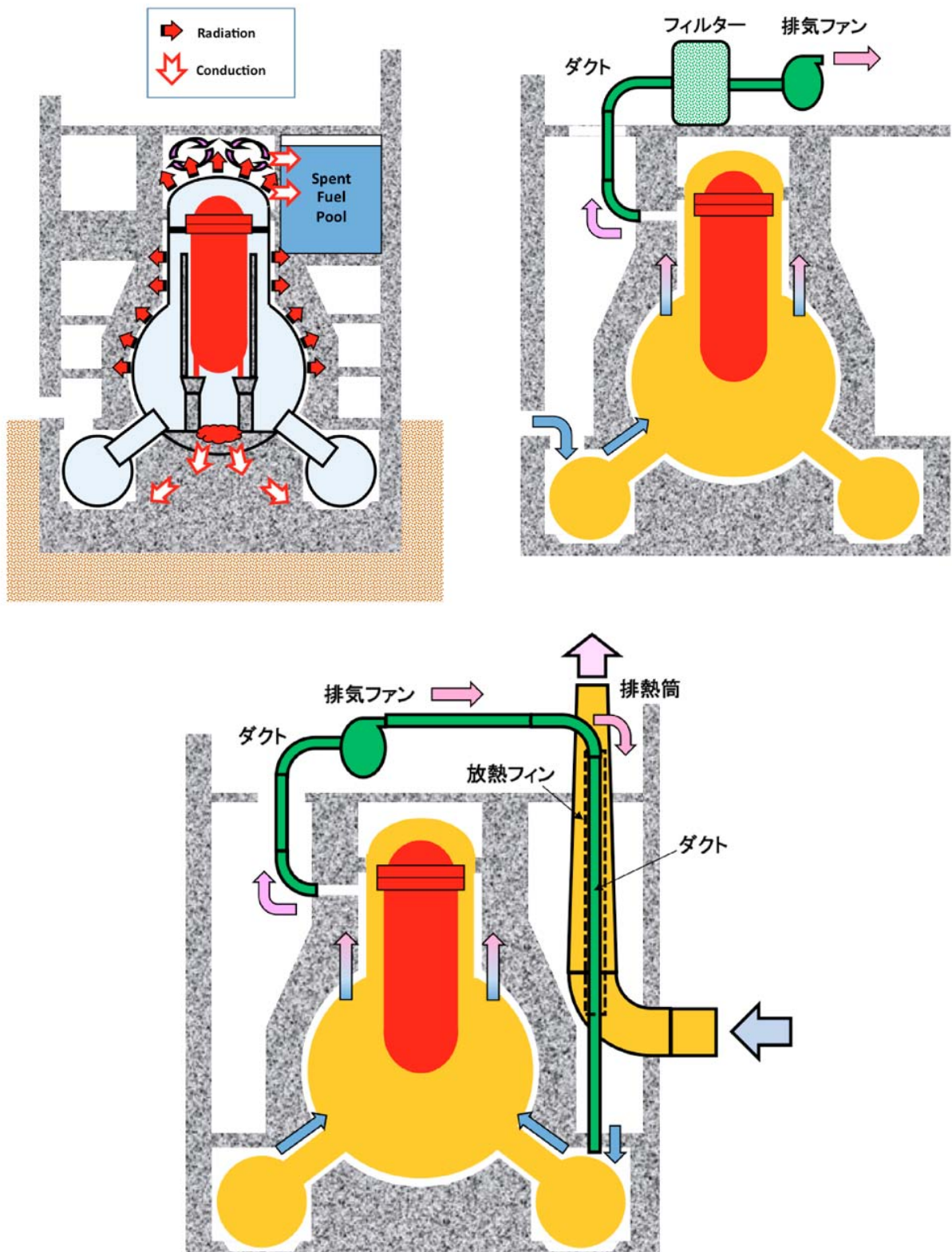


図7：「フクシマ・クロージャー・プラン」において考慮した格納容器からの熱伝導と排熱の概念
(出典：筆者)

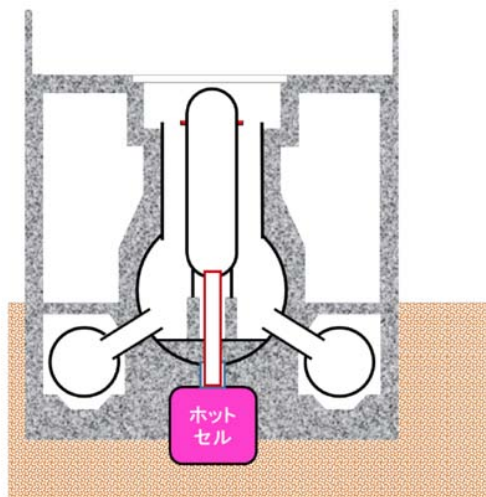
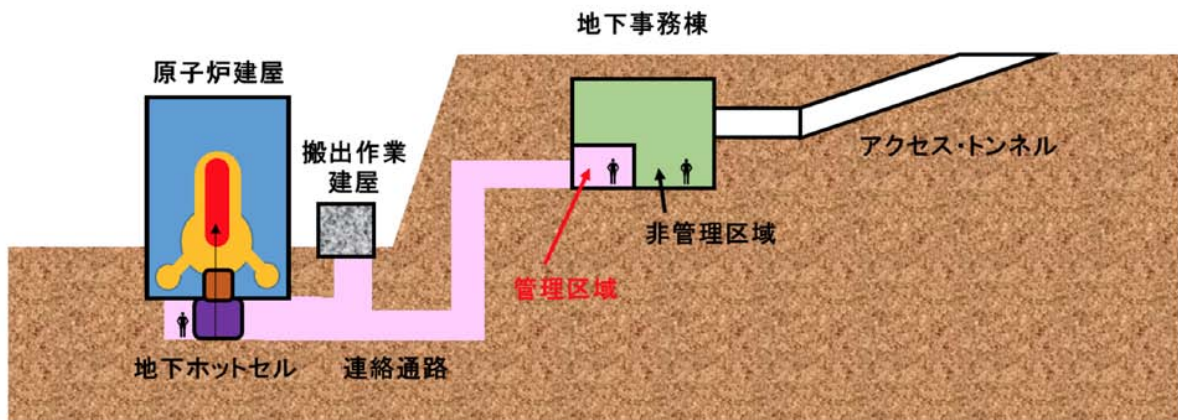
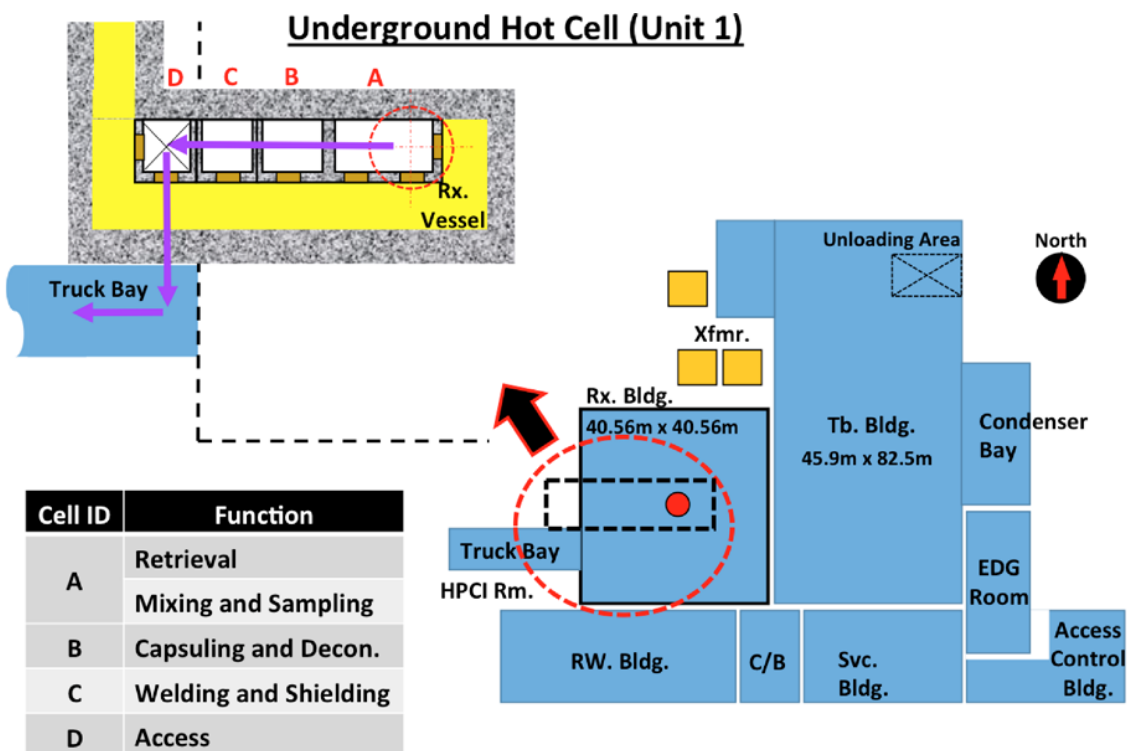


図8：「フクシマ・クロージャー・プラン」において提案した地下ホットセルの概念
(出典：筆者)



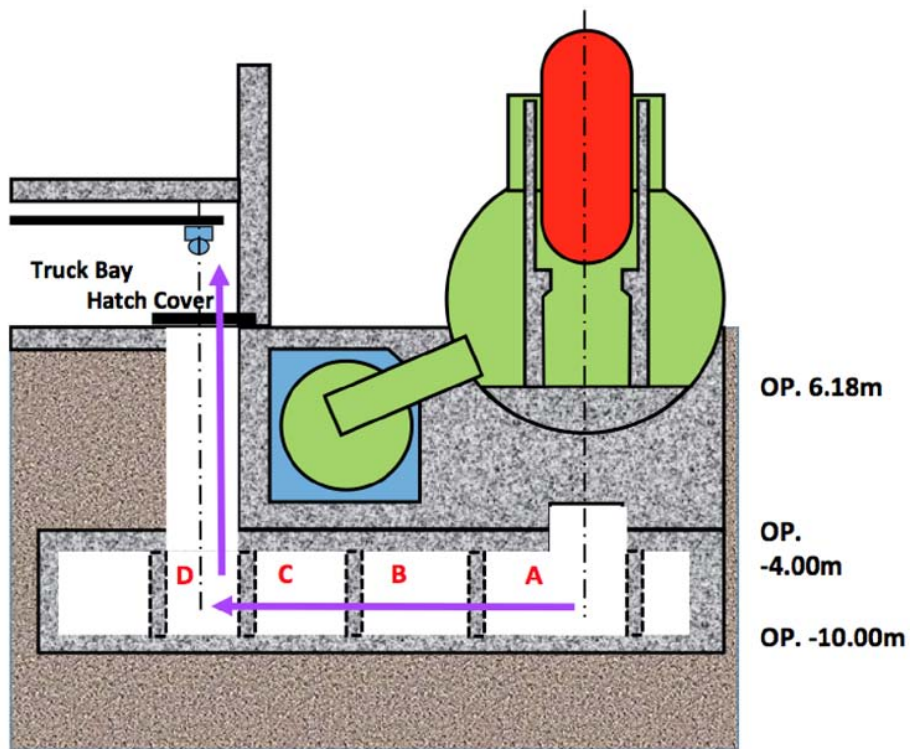
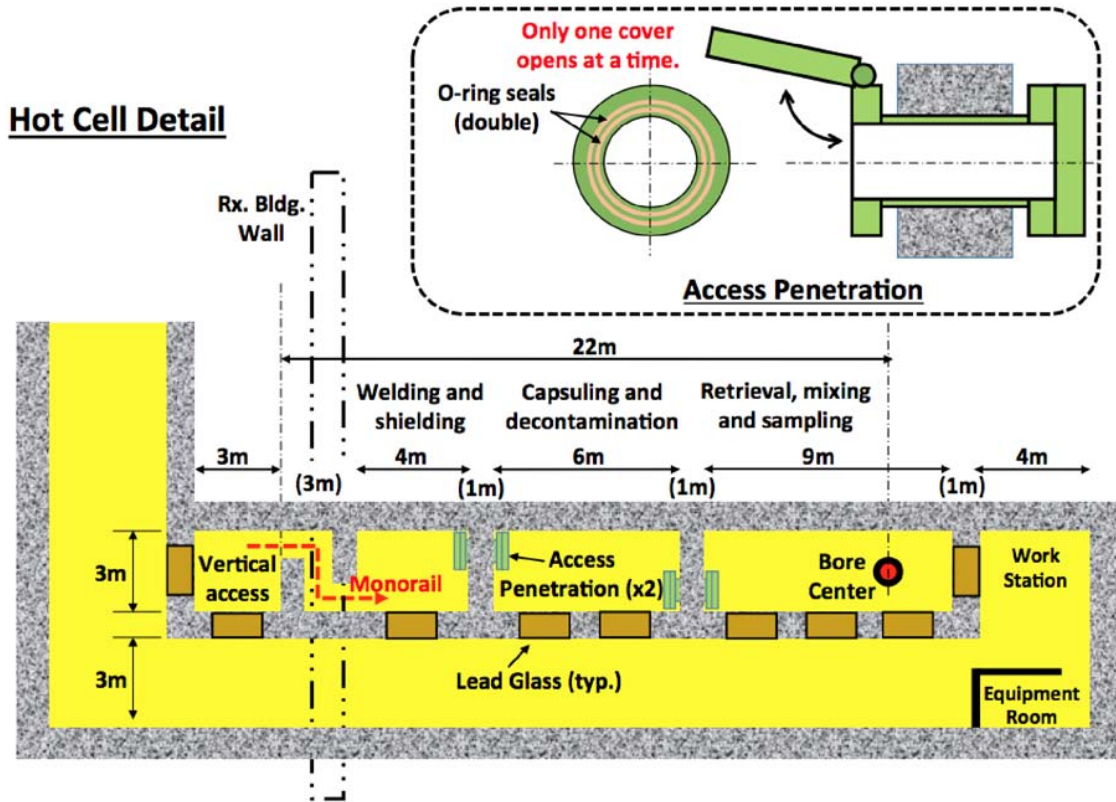
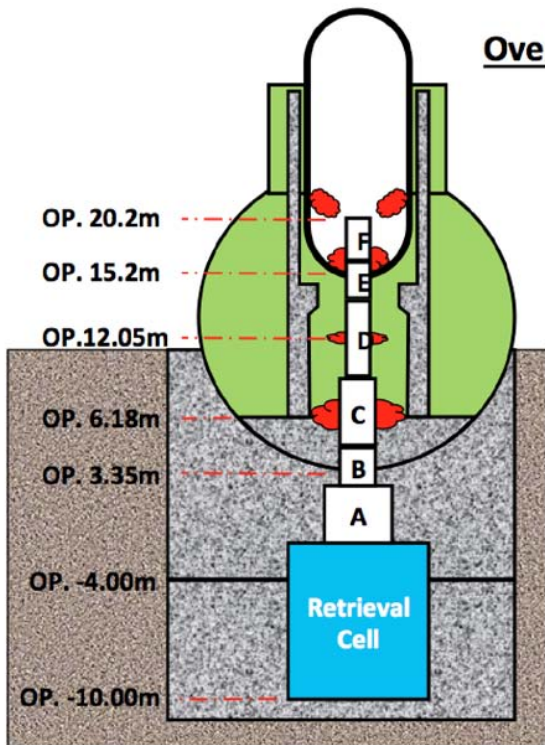


図9：「フクシマ・クロージャー・プラン」において提案した地下ホットセルの詳細
(出典：筆者)

Overhead Bore Hole (Unit 1)



	Elevation		Height	Bore ID
	Bottom	Top		
Cell	-10.0	-3.0	-	-
A	-3.0	2.0	5.0m	1000mm
B	2.0	4.0	2.0	300
C	4.0	8.0	4.0	300
D	8.0	14.5	6.5	150
E	14.5	17.0	2.5	150
F	17.0	20.2	3.2	150

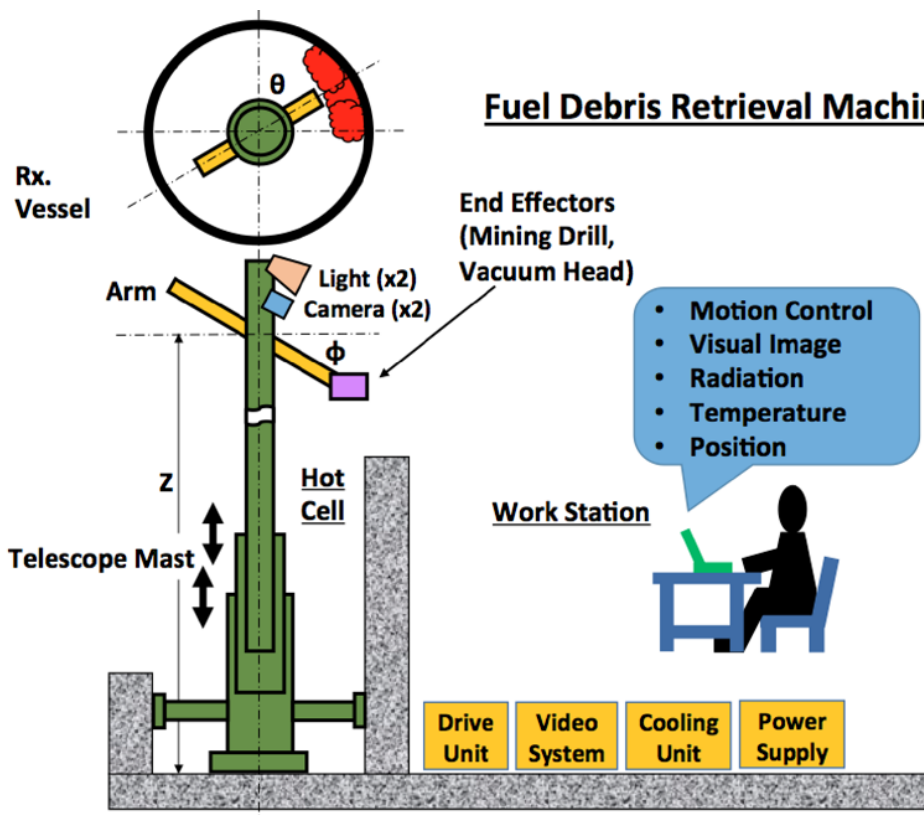
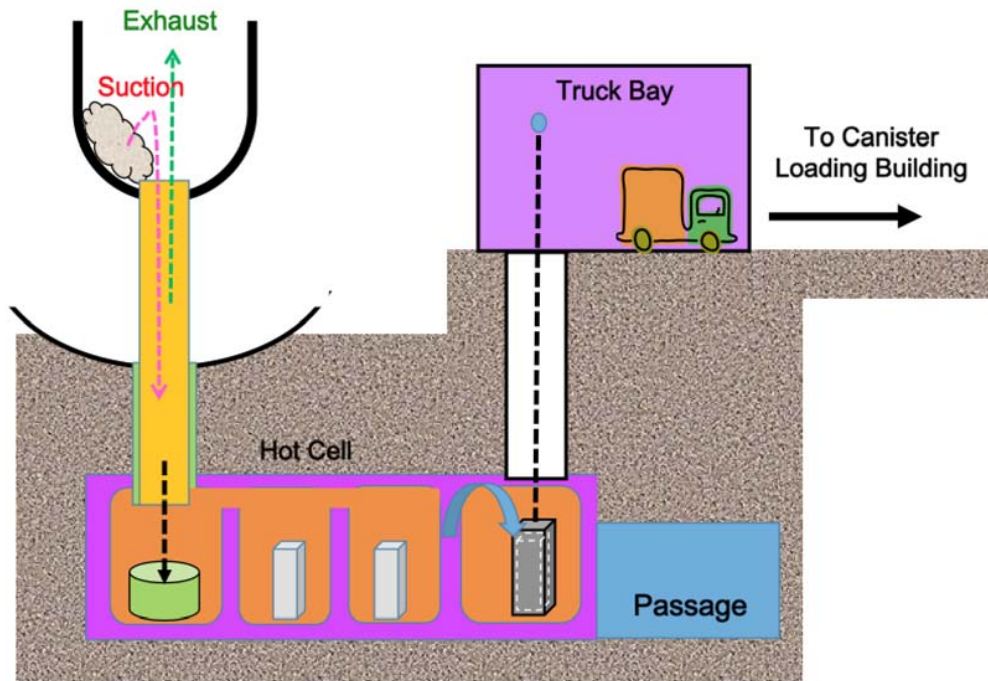


図10：「フクシマ・クロージャー・プラン」において提案した地下ホットセルからの燃料デブリ回収の概念
(出典：筆者)



Capsule & Shield Cask

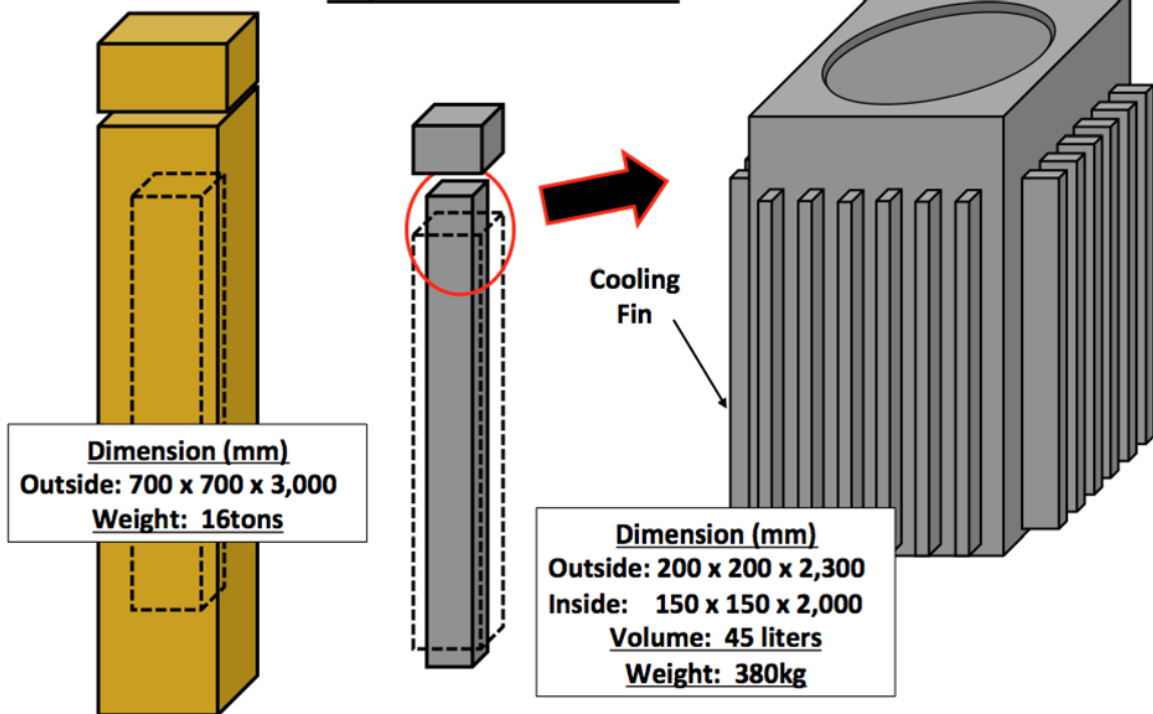


図11：「フクシマ・クロージャー・プラン」において提案した地下ホットセルから燃料デブリを搬出するためのカプセルと遮蔽容器の概念

(出典：筆者)

Canister Loading Building

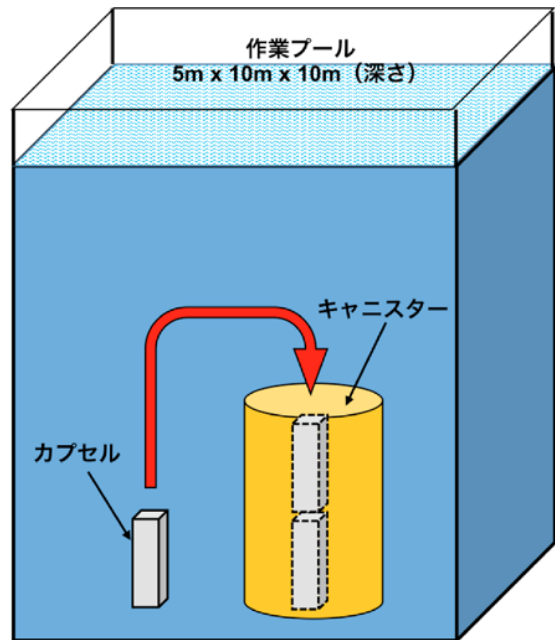
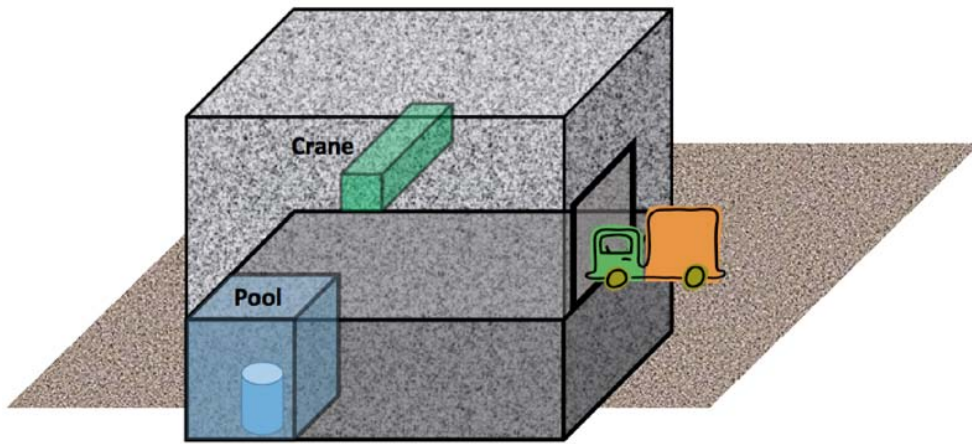
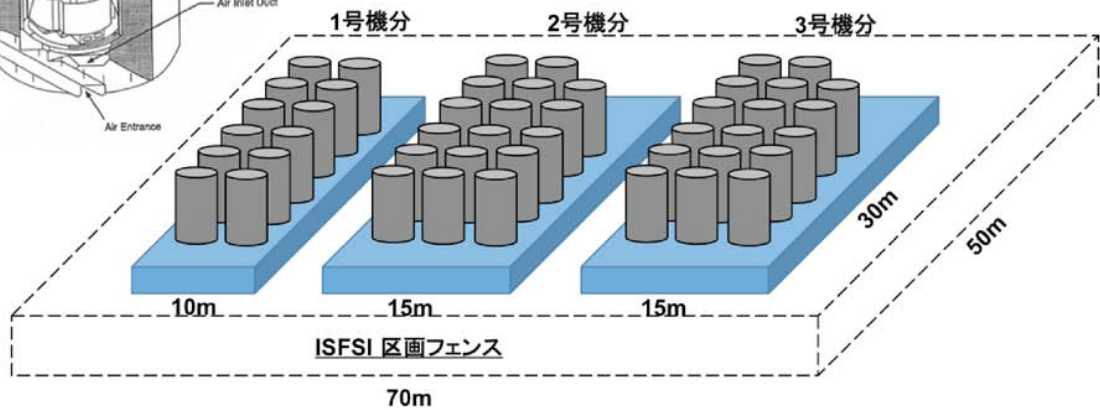
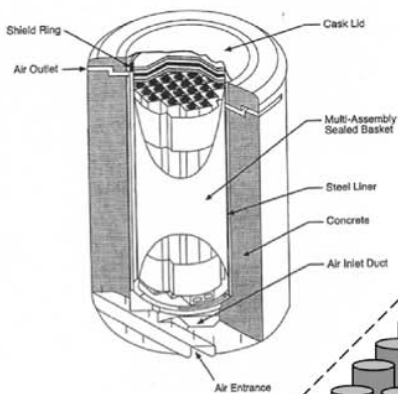


図 12：「フクシマ・クロージャー・プラン」において提案した燃料デブリ収納カプセルのキャスク装荷と保管
(出典：筆者)



燃料デブリの冷却方式

NDFが、水冷方式から空冷方式への切り替えを躊躇している理由については、推測できないこともない。乾燥した燃料デブリから、気流に乗って粉塵が舞い、格納容器内（水抜き後、ベント管、ダウンカマを介して空間が連通するサブプレッション・プールも含む）の機器、構造物の表面に付着してしまい、これが α 核種であると同時に核分裂性物質（具体的には、プルトニウム同位体（Pu-238, Pu-239, Pu-240, Pu-241）、アメリシウム同位体（Am-241, Am-242m, Am-243）、キュリウム同位体（Cm-242, Cm-243, Cm-244））であることから、その性質に伴って、幾つかの厄介な問題が生じてしまうのである。

まず、 α 核種の放射能毒性は、通常の β 核種のそれと比べて著しく高く、しかも精度のよい検出が難しいため、より高度な放射線管理と作業管理が必要となる。たとえば環境測定には、特殊なZnS（Ag）シンチレーション・カウンターが必要で、作業者の内部被曝の管理にも、ホールボディカウンターによる計測ができず、バイオアッセイ法が必要になる。次に、 α 核種で汚染した廃棄物の取り扱いが特殊で、その密度によっては、浅地中処分のできない分類の放射性廃棄物（GTCC）となってしまう可能性があることである。最後に、核分裂性物質であることから、核種毎に精度の高い計量管理が求められる。

燃料デブリを単に乾燥させただけでもリスクはあるが、回収のために気中で切削や研削を行う場合には、それらのリスクが著しく増加することになる。

しかし、それでは燃料デブリを水に浸漬したまま切削、研削して回収するのが良策かと言えばそうとは限らない。そのような作業によって発生する燃料デブリの微細粒子から大量の α 核種を含む放射性物質が溶出し、水処理系統全体に汚染が拡大してしまうからである。そして、水冷を続ける限り汚染水の発生は終わらない。冷却水を循環させるループには、脱気装置が設置されておらず、冷却水が溶存酸素を含んでいる点にも注意をする必要がある。格納容器内の雰囲気は不活性化されているのだが、冷却水には酸素と二酸化炭素が含まれており、保護されていない鋼板やコンクリートの表面に対しては、十分に不活性ではない可能性がある。

結論として、空冷方式にも留意しなければならない点はあるが、際限なく発生し続け、増え続ける汚染

水の問題を断ち切るためには、現在まで続けてきた水冷方式を終わらせ、空冷方式に切り替える必要がある。

燃料デブリの回収方法

X-6ペネからロボット・アームでペDESTAL内部にアクセスして燃料デブリを回収するというNDFが開発を進めている「気中—横アクセス工法」には、以下の難点があり、2号機におけるパイロット試験が成功したとしても、それがこの後の本格規模での作業の成功を保証する経験にはならない。

- ・ 燃料デブリのサンプルをペDESTAL内部から採取するのは比較的容易である。しかし、実際には燃料デブリが、原子炉圧力容器の底部と炉内構造物の一部に融着して残留している。そして、損傷した原子炉圧力容器の底部から流出した燃料デブリについても、CRDハウジング、CRDレストレント・ビームなどの複雑な構造物と、CRD脱着作業プラットフォームのグレーチングやケーブル・トレイなどに散布され、固着しており、さらに、ペDESTAL内に留まっているものもあるが、ペDESTAL底部のアクセス口からドライウェル底面に流出して拡大したものもあると思われる。ペDESTALの壁も床も、そしてドライウェルの床面もすべてコンクリートである。溶融炉心、すなわち「コリウム」とも呼ばれる溶融金属とウラン酸化物の混在した物質は、その流れに沿ってコンクリートも融かし、溶岩のように振る舞う。大量の固化した岩質の溶岩が、チェルノブイリ4号機において発見されており、「チェルノビライト」と命名されている。したがって、そのようなチェルノビライトと似た性状の物質が、福島第一原子力発電所の1～3号機においても融けたコリウムの流れが接触した部位に形成されている可能性がある。また、融けたコリウムの一部は、サンピットを満たし、深く下方に侵食した可能性がある。したがって、もし、それらをすべて回収することを目標とするならば、ロボット・アームには、より多くの関節と自由度が必要になる。しかし、仮にそのように多くの関節と自由度が与えられたとしても、果たしてそれらを駆使して燃料デブリをすべて、あるいは大部分回収できる保証はなく、その信頼性を確認するためには、まずはプロトタイプを製作し、さま

ざまな状態を想定したフルスケールのモックアップによる実証試験も必要になるものと思われる。さらに以上の事情に加え、以下に述べる理由から、原子炉圧力容器の内部へのアクセスにはさらなる困難が予想され、ましてその中からのデブリの回収ともなると一層の困難が予想される。

過去に行われたペDESTAL内でのカメラを使った観察は、単純にそのように装置が設計されていなかったという理由によるものではあるものの、上向きではなかった。そのため、燃料デブリが流出した開口部の位置、数、形状、大きさに関しては、推測する情報さえない。NDFは、複数箇所と推測しているが、それは単に数カ所から水面に水が滴下しているからにすぎない。そのような推測が正しいとも誤りだとも断定はできない。原子炉圧力容器の下鏡と水面の間には、実に数多くの機器が複雑に連結しており、水が滴下する箇所数が開口部の数と一致するとは限らないからである。ただし一つ確実なことは、少なくとも1カ所の開口部は、燃料集合体の上部タイプレートを通過させるだけの大

きさであるということである。発見された以外にも数多くが空中に引っ掛かったままになっている可能性がある。以下の略図に示されるように、原子炉圧力容器の真下には、CRDハウジング、ICMハウジング、CRDレストレントなどの機器や構造物があり、これらが、燃料デブリが流出する際の機械的荷重と熱によって、著しく変形してしまっている可能性がある。そのため、ロボット・アームが開口部まで辿り着くためには、直線的にはではなく、複雑な3次元の軌道に沿って進まなければならない。

上記の問題をクリアし、何とかアクセスできたとしても、原子炉圧力容器内部や残存している炉内構造物がどのような形状になっていて、燃料デブリがどのような部位にどのように残留、固着しているか不明である。燃料デブリの一部は、CRDハウジングやICMハウジングの内部の狭い隙間や、ボトム・ドレンの中にまで入り込んでいる可能性がある。しかし、それを回収するためには、どのような複雑で狭い部位にでも、切削ビットや研磨砥石などをアクセスさせる必要がある。

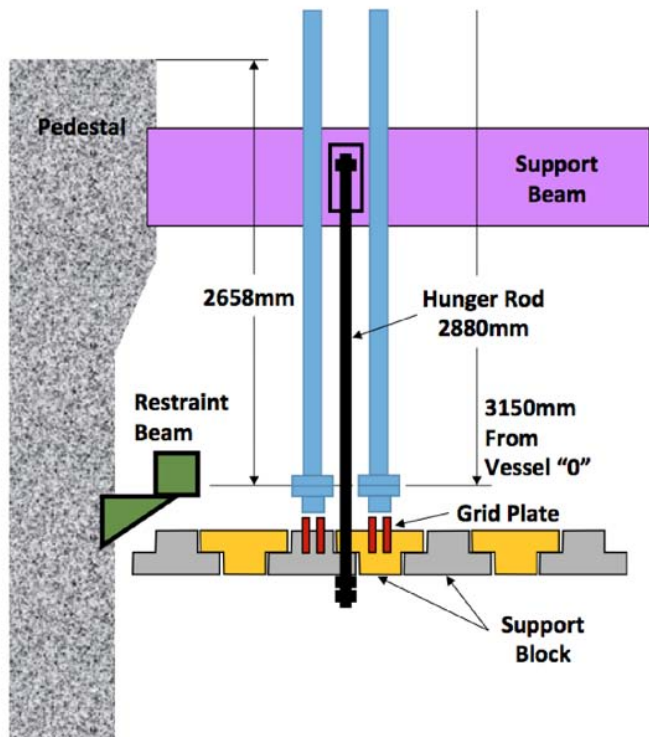


図13：原子炉圧力容器下部の錯綜状態
(出典：筆者)

- ・ 原子炉压力容器内と格納容器内の燃料デブリの分布状況に関しては、号機によって異なるものと推測されている。1号機の場合には、岩状に固化した「チェルノビライト」が大量に掘削されなければならないものと推測され、一方2号機の場合には、燃料デブリのかかなりの部分が原子炉压力容器内に残っているものと推測されている。そして、3号機の場合には、多かれ少なかれそのどちらにも有しているものと思われる。
- ・ ペDESTAL内に堆積した燃料デブリの性状については、これまで上部にあるものを調査することができているだけで、今は、小石状、砂状、粘土状などと判断しているが、それらの下には、より大きな塊となって合体、融合している可能性もある。
- ・ シールドボックスなどの設備をX-6ペネの付近に設定する必要があるが、放射線レベルが高く、作業にはかなりの被曝が伴う。

筆者の意見としては、総合的に相対的評価をしてNDFの「気中一横アクセス工法」が、筆者の「フクシマ・クロージャー・プラン」に優るアプローチだったとは思われない。

凍土壁は、壕の案と比べ、遮水能力が低く、コストが高い。特に、壕のようにパッシブ設計ではないため、完成後の運転、監視、点検、メンテナンスにもコストと人員を要し、被曝も伴う。壕の場合の付加価値（必ずしも利用する必要はないが、ドライ・アイランド化によって地下水位が全体的に低下するため、廃棄物を埋設処理するためのトレンチが造れること、壕を敷地のセキュリティ境界として利用できること）も期待できない。

原子炉建屋1階に設置するシールドボックスは、地下に設置するホットセルよりも、設置工事自体は容易で低コストと思われるが、利用するときの放射線環境としては、2号機の場合でさえ顕著に劣り、3号機になると一層厳しく、1号機は最悪である。そのため作業者は、放射能汚染から身を守るための防護服と全面マスクからなる重装備を余儀なくされる。ロボット・アームの操作とメンテナンスのためには、その業務に就く前に、十分な研修を経て認定されなければならない。しかし、せっかくそのように技量を習得した作業業者でも、長期間従事できない可能性がある。

燃料デブリを回収するためのロボット・アームをX-6ペネから目的の部位までアクセスさせる場合には、ペDESTALや原子炉压力容器の中心軸に沿ってテレスコープ式のマストを伸縮させる地下からのアクセスとは異なり位置についての回転対称性がないため、多数の関節と自由度を駆使した複雑な運動が必要となる。これは、現状のロボット・アームの技術では、著しく対応が困難なものであるように思われる。

この点、構造の単純な伸縮マストであれば、デブリの回収作業の成功率は高くなると思われるのではあるが、それでも率直なところ筆者としては、十分な範囲に対してこれが行えると確信できないことを認めざるを得ない。上述の通り、あまりにもさまざまな状態が考え得るからである。一方、筆者が「フクシマ・クロージャー・プラン」を提出してから7年以上を経た今、その間にみられた他のロボット技術の進化によっては、大いに期待を抱くこともできる。そのような進化を次の数十年に対して外挿するならば、この技術は一層進化して成熟し、燃料デブリの回収にも応用することができるようになってきていることだろう。それならば、今現在の未熟な技術を寄せ集めして戦略を練るのではなく、そのような進化する技術に期待をして、別の道を探るということもできるはずである。これを称して筆者は「プランC」と呼ぶことにし、その内容については詳しく後述する。

2.4. 廃棄物対策

2013年に凍土壁の採用理由が説明されたとき、その一つは、地下にコンクリート製の恒久的な構造物を残さないためであるとのことであった。あたかも、福島第一原子力発電所の敷地内にある建物が、地上にあるものも地下にあるものも、最終的にはすべて撤去する計画であり、それに逆行するような設備の追加は避けなければならないと言っているようであった。しかし、仮にそのような基本方針があるものとする、現在NDFが進めている廃棄物対策はこれとは整合しておらず、敷地の全域、あるいはほとんどを緑地に復旧することを目指しているとは見受けられない。

すなわち、次に示される廃棄物の貯蔵計画によれば、東京電力は、敷地内に大型の貯蔵施設をどんどん増築していくのだが、そのような貯蔵施設こそ、新たに追加される恒久的な構造物であるように思えるからである。もし仮に最終的に緑地復旧を目指すのであれば、敷地内の廃棄物は、少なくとも発生量と同じくらいのペースで最終処分施設に向けて搬出されるか、あるいは、新たに建物を増やすのではなく、既存のタービン建屋などにある空間を最大限利用して、保管スペースを確保する工夫をするべきなのである。

したがって、そのような工夫も検討も見受けられないこと自体、最終的に緑地化を目指していないことを示唆するものである。NDFが公金で運営されている組織である以上、その意図は、公衆に対しては完全に透明でなければならないはずである。したがって、もし、NDFにとっても経済産業省にとっても、その目指すところもはや緑地への復旧でないとするならば、その旨は、明確に技術戦略プランや中長期ロードマップの中において表明しておくべきである。そもそも敷地の土壌の汚染レベルを考慮すれば、緑地復旧は非現実的だったのであり、一旦この現実が公的に受け入れられて合意されたならば、廃炉計画は、全体的に大幅に融通性の利くものとなり、効率的で経済的なものとなる。低レベル放射性廃棄物を収納する保管施設の建屋の数は、「ドライ・アイランド」の概念を実行することによって地下水レベルが海水面レベルまで低下し、大型の地下トレンチを造成することが可能となり、最小限に抑えることが可能となるはずである。

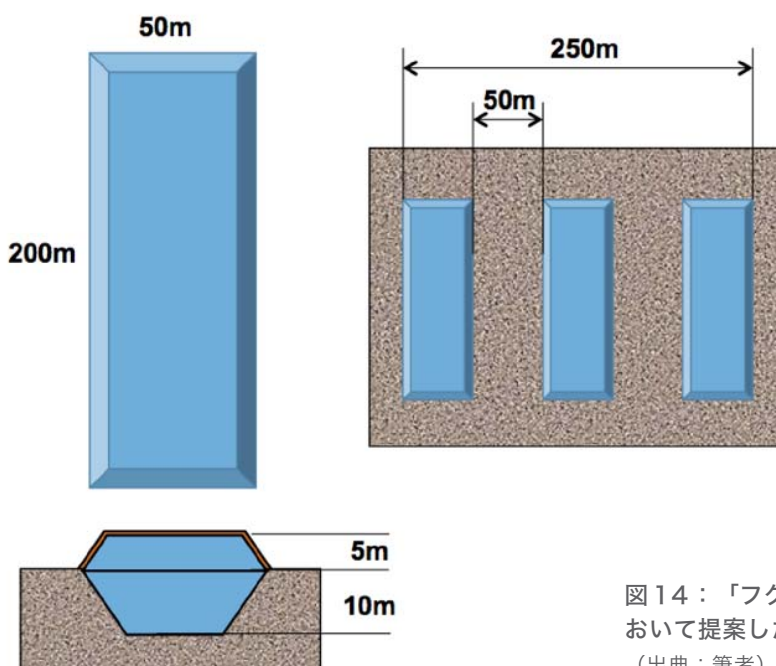


図14：「フクシマ・クロージャー・プラン」において提案した廃棄物埋設用大型トレンチ
(出典：筆者)

2.4.1 福島第一原子力発電所における廃棄物の貯蔵計画

東京電力による「福島第一原子力発電所 固体廃棄物の保管管理計画 ～2020年度改訂について～」(2020年9月14日)によれば、第1棟から第8棟までの既設固体廃棄物貯蔵庫に加え、第9棟が2018年2月から運用を開始しており、さらに増設固体廃棄物貯蔵庫と称される第10棟と第11棟の建設が、2022年度以降に竣工し、使用される予定となっている。

同資料によると、福島第一原子力発電所内で2032年3月までに発生する放射性廃棄物の物量は、約784,000m³と予想されている。このうち約203,000m³が再利用対象で、残りの約581,000m³が保管対象である。ただしこの保管対象は、約261,000m³に減容化されて保管されることになる。再利用が検討される対象は、0.005mSv/hのしきい値以下に対してであり、主にそれまでに解体されると予想される処理水タンク(約62,000m³)、その他HICステンレス補強体、除染後のブルータンク、鋼材など約141,000m³が、内訳として含まれている。焼却可能な雑固体廃棄物(伐採木や使用済保護衣など)に対しては焼却設備が用意され、2020年度内の竣工が予定されている。これが減容処理の主力を担い、予想発生量274,000m³が21,000m³にまで減容化されると期待されている。また、不燃性の雑固体廃棄物に用いられるコンクリート破砕器や金属切断機などからなる減容処理施設についても、2022年度内の竣工を目指して設置工事が進められており、これによって、136,000m³の発生量が69,000m³に減容化されるものと期待されている。

一方、減容化できない放射性廃棄物の中には、汚染土壌の約53,000m³が含まれており、これを金属容器に詰め、第10棟(保管容量80,000m³)に収納する予定となっている。また、上述のしきい値を超えるがれき(金属、コンクリートなど118,000m³)は、現在、その一部は容器に収納されているが、シート養生をただけのものや覆土式一時保管施設に保管されているものもあり、これらは前述の第10棟と第11棟(保管容量115,000m³)に収納される予定となっている。これらが運用されることで、屋外に保管されている廃棄物は、2028年度にはすべて屋内に移され、汚染拡大のリスクの懸念が解消されると述べている。

沈澱処理生成物やALPSなどの使用済吸着塔(約6,200基)などからなる水処理二次廃棄物に対しては、上述の増設固体廃棄物貯蔵庫とは別に、大型廃棄物保管庫が充てられる予定で、2021年度の運用を目指して現在、設置工事が進められている。

以上の計画から、2032年頃の福島第一原子力発電所の敷地の景観を全体的にイメージすると、依然として1～6号機の原子炉建屋、タービン建屋、プロセス主建屋、高温焼却炉建屋などが残っているだけでなく、むしろ、焼却施設や減容処理施設、巨大な11棟からなる固体廃棄物貯蔵庫と大型廃棄物保管庫が増えており、そして、その頃までには排水されているかまだ貯水が続いているかは分らないが、溶接タイプの処理水タンクもそのまま残されている。

仮にそれからの20年間を、これらの残存している原子炉建屋やタービン建屋の解体に費やしたところで何になるだろうか。また新たにそのような作業で発生する瓦礫などのため、追加の貯蔵施設が必要になるだけである。

2.4.2 原子力発電所の廃炉に伴って発生する廃棄物

前述の2019年2月に発行されたWNA廃棄物管理・廃炉ワーキング・グループによる「原子力施設の廃止措置によって発生する資材と廃棄物を管理するための方法」には、その本文に、ドイツのBWRプラントであるヴェルガッセン(Würgassen)原子力発電所(運転期間1975年11月11日～1994年8月26日 設備容量640MWe)における廃炉に伴って発生した廃棄物の物量について、次のような内訳が示されている。

- ・ 無制限で一般解放(リリース)されたもの
255,000トン
- ・ 条件付でリサイクルに供されたもの
3,000トン
- ・ 放射性廃棄物
4,600トン

運転期間中に大きなトラブルや事故さえ起こさなければ、原子炉建屋やタービン建屋の鉄筋コンクリートを破碎した瓦礫は、上に示したように、ほとんどを無制限で一般解放することができ、その物量は、1基当たり25万トンにも達する。

また、同資料のAppendix 6「スペインにおける廃炉廃棄物の管理（Decommissioning Waste Management in Spain）」においては、ホセ・カブレラ原子力発電所（別名を「ゾリータ原子力発電所」とも言い、同資料ではこちらの名称が使われている）の廃炉の実績が詳細に解説されている。同原子力発電所は、発電出力（正味）141MWeの小型のウェスチングハウス製PWRプラントで、1969年に商用運転を開始し、2006年に終了している。廃炉は、2010年から始まり、当初は2016年までに終える予定であったが、解体作業が2018年までかかっており、その後も敷地の復旧作業と確認が行われている。発生した廃棄物量については、以下の通りであると報告されている。

- ・ 通常のコンクリート瓦礫
95,300トン（埋立て用として利用）
- ・ 通常のスクラップ
4,700トン（リサイクル）
- ・ VLLW、LLW、ILW
4,000トン（放射性廃棄物管理公社エンレサに移管）
- ・ 使用済燃料
175トン（ISFSI）
- ・ 炉内構造物
43トン（ISFSI）
- ・ 危険廃棄物
少量（管理保管）

これらの情報に基づくならば、福島第一原子力発電所1～6号機の解体に伴っては、150～200万トンもの膨大な量の瓦礫とスクラップが発生することになる。これらは、他の廃炉プラントとは違って、放射性的エアボーンやウォーターボーンに曝露されてしまっており、たとえ大部分が非放射性廃棄物として扱われる期待があるにしても、保守的に汚染しているものと仮定しなければならない。その上で、一部に対して無条件に解放するためには、 α 核種も含めてすべての潜在的な汚染核種に対し、極めて低いバックグラウンドの条件下において、高感度の測定器による入念で正確なスクリーニングを行う必要がある。

それを省く場合には、それなりの技術的な正当性が求められる。この場合、改めて留意すべきは、その物量が150～200万トンにも達することである。すなわち、毎日150～200トンもの量をスクリーニングしたとしても、実に10,000日（約30年）を要してしまうことになるのである。そして、予めそれらの引取り先と運搬方法が用意されていない限り、敷地内に残されることになってしまうのである。

すべての既設の建屋を解体して無数のコンクリート片と鉄屑にし、次にそれぞれの小片に対して一個一個スクリーニングを行い、最後にそれらをトラックや船に載せて搬出して再利用するといった処分方法は、まったく現実的ではない。そして、仮にここまで実行したとしても、まだ緑地に戻すという廃炉の構想の最後に行き着いていない。すなわち、最後には地下深くまで浸透した放射性物質を含んだ膨大な量の汚染土壌の処理が残される。

日本原燃が青森県六ヶ所村に所有する同社の埋設事業のための施設「低レベル放射性廃棄物埋設センター」は、最終的には約600,000m³まで拡張できるとのことではあるが、現時点では、1号埋設施設と2号埋設施設がそれぞれ40,000m³の容量で操業しているだけで、増設の計画が立てられている3号埋設施設の容量も42,000m³である。他の電力会社に対する平等性も考慮した場合、福島第一原子力発電所の廃炉のために優先して後の利用の機会を閉ざしてしまうわけにはいかず、仮にそう強行したとしても絶対的に容量が足りず、全量の受け入れは不可能である。

結局、発生する膨大な量の放射性廃棄物の引取り先が当てにできない限り、40年後の福島第一原子力発電所の敷地が、その中に何も無い広々とした緑地になっていて、どのような用途にも無制約、無条件で転用できる状態になっているという夢が実現することは、たとえ今世紀の末まで待ったとしてもあり得ない。また、これを実現するために貴重なリソースを投入する上での費用対効果が正当化できるともそれだけのインセンティブがあるとも思われない。もはや、10年前の非現実的な政治的、感情的なだけの誇大な壮言に対する無理な期待から覚醒するときである。「迅速性」は、政府による中長期ロードマップにおいても、NDFの技術戦略プランにおいても言及されている5項目のうちの一つの重要項目として位置付けられていたのではあるが、再考すべきである。そのような無理な中長期ロードマップによって自縄自縛に陥ることを避け、現実的な100年の計に基づいて

取り組むならば、むしろ筆者が提案する壕によって囲まれたドライ・アイランドにした敷地を隔離することで、より容易により安全により経済的に合理的に、最終処分までの工程を効率的に達成できるものと思われる。

2.4.3 燃料デブリ以外の廃棄物

NDFの技術戦略プラン2020には、震災直後、プロセス主建屋、高温焼却炉建屋の地階に置かれていたゼオライト土壌の表面線量が、それぞれ3Sv/h、4Sv/hもあることが2019年12月になって判明し、それらをどのように回収したらよいかという問題が新たに浮上したと言及している。しかし、そのような回収や取り扱いの難しい放射性廃棄物は、他にもまだ幾つかある。

たとえば、1～6号機の使用済燃料プールには、使用済燃料の他にも、使用済の制御棒、中性子検出器、中性子源、高線量スラッジを回収した使用済フィルターなどの高線量の廃棄物が残されている。廃棄物処理施設には、高線量のフィルタースラッジや使用済交換樹脂を蓄えたタンクもある。共用プールには、膨大な量の使用済燃料、制御棒、チャンネル・ボックスが保管されている。また、1990年代から始められた1～3号機と5号機に対して行われた大規模な炉内構造物の交換工事によっては、炉心シュラウド、上部格子板、ジェット・ポンプなどの高線量の機器が細断され、バスケットに入れられただけで同プールの一角に水中保管されている。さらに、4号機のドライヤー・セパレーター・ピット (DSP) には、同じ大規模な炉内構造物の交換工事が、2011年3月11日に突然中断され、そのまま水中に保管され続けている。これらの機器は、低レベル放射性廃棄物の中でも、通常は最も高い「クラスC」よりもさらに高いGTCC (Greater Than Class C) として分類され、使用済燃料に準じて地層処分が適用されるものである。したがって、前述の日本原燃の「低レベル放射性廃棄物埋設センター」でも、受け入れることができない。GTCC廃棄物は、米国においては、暫定的に使用済燃料と同じような乾式キャスクに収納して、その専用施設 (ISFSI) に使用済燃料と一緒に保管されている。

以上の高線量廃棄物の問題に加えて問題になるのが、 α 核種による高汚染廃棄物の問題である。実は

そのような廃棄物の処分方法についても明確ではなく、米国ではGTCCの分類に含まれている。

東京電力によって2019年3月以降に実施された調査によれば、2、3号機の原子炉建屋地階トラス室には、比較的高い濃度の α 核種を含んだ汚染水が滞留しており、それぞれ約6,000m³と推定されている。 α 核種の放射性物質とは、主に放射性的プルトニウム (Pu-238, Pu-239, Pu-240, Pu-241)、アメリシウム (Am-241, Am-242m, Am-243)、キュリウム (Cm-242, Cm-243, Cm-244) で、大部分は0.1 μ mのフィルターで除去できるが、0.1 μ m以下の粒子やイオン性も成分もあると考えられている。2号機の滞留水に対するある分析の結果、全放射能の濃度は1x10⁹Bq/Lであるが、その中には2.61x10⁵Bq/Lの α 核種が含まれていた。 α 核種の放射能毒性の高さを考慮すれば、決して無視できない。

東京電力によれば、現在、1～3号機の原子炉建屋地階とプロセス主建屋 (PMB)、高温焼却炉建屋 (HTI) にある全滞留水に含まれる放射性物質の全インベントリーは、6.9x10¹⁴Bqであり、排水後に露出する床面には、1.9x10¹³Bqのスラッジが残る。そしてその中でも一定量の α 核種が含まれている。

以上は、今の滞留水を処理する場合についてであって、燃料デブリの回収を切削や研削によって行えば、気中にしる、水中にしる、さらに α 核種が放出されることになる。それにより、 α 核種の放射性物質による汚染が、サプレッション・プール (トラス) を含む格納容器内全体に広がり、これを解体する際、処理の手間が掛るGTCCの廃棄物量が増加する可能性がある。同時に、作業者が α 核種の内部被曝をする危険度も増す。

以上のような理由から、使用済燃料プールは、単に使用済燃料の取り出しさえ終わってしまえば直ぐにでも水を抜いて解体作業へと進めるわけではなく、原子炉圧力容器や格納容器 (ペDESTAL内部を含むドライウエルとサプレッション・プール (トラス) を含む) についても、一通り燃料デブリを掻き出し終えたからと言って直ちに解体できるほど完全ではなく、放射線レベルが低いわけでもなく、依然と通常の廃炉作業に比べて厳しい放射線環境である。さらに、原子炉建屋、タービン建屋の地階底部には、高レベル

の放射性スラッジが付着しており、コンクリートにも染み通っている。そして、その亀裂から浸透して流出した地下の土壌には、地下水脈に沿って広く、深く放射性物質による汚染が広がっている。

そこで、100年の計から中長期ロードマップを再考するにおいては、果たして以上の高線量廃棄物や α 核種による高汚染廃棄物の処理に、拙速に手を出すべきかという問題も取り上げるべきである。今、そのような無理をした場合には、不要な作業員の外部被曝と α 核種による内部被曝のリスクが増し、それらを軽減するための管理と対策、コストが増すことになる。

原子炉停止直後の燃料に含まれる α 核種のインベントリーは、多い順にPu-241、Cm-242、Pu-238、Cm-244、Pu-239、Pu-240、Am-241であるが、これらのうち上位4番目までの半減期が、それぞれ14年、160日、87.74年、18.1年であり、5番目以下と比較して顕著に短い。したがって、50年後、100年後には、それが顕著に減衰すると期待できる。

さらに、100年、50年を待たずして、ヒューマノイドの技術が劇的に進化し、高度で複雑な運動が可能になり、ゼオライト土壌やGTCCなどの高線量廃棄物の取り扱いや処理、 α 核種による高汚染廃棄物の除染や処理にも応用できるようになるものと期待できる。



3. 代案

過去、初めから無理だと分っていた「冠水－上アクセス工法」に延々と拘り続け、正式に断念したのはようやく2018年であった。遮水能力の限界が懸念されていた凍土壁の採用を強行した結果、懸念はやはり現実となった。そして、今NDFが傾注する「気中－横アクセス工法」にしても、サンプル採取までのパイロット試験と本格作業の規模との大きな難度の隔たりを考慮した場合、早晚頓挫に直面する可能性が大きい。そして仮に、スケジュールに大幅な遅れが生じながらも、さまざまな困難を克服して燃料デブリの回収を成し遂げたとしても、結局その後、使用済燃料や低レベル放射性廃棄物の最終処分（バックエンド）のインフラ未整備により、それらが大量に敷地内に貯蔵されたままで、長い待機状態が続くことになる。

結局、「40年で緑地に復旧する」と公約していたかと思えた当初の福島第一原子力発電所の廃炉は、目指すその最終状態が曖昧になってきており、 $10\mu\text{Sv}/\text{年}$ の基準の達成や、無制約、無条件の解放は言うまでもなく、少なくとも過去に海外で実績のある原子力発電所の廃炉のようにはなり得ない。したがって、まずは緑地復旧という光輝く幻想で国民を欺瞞することも、それを無理に追求し続けることも止め、現実に沿った達成可能なロードマップを、40年という「中長期」を超え、100年の計として策定し直す必要がある。ここまでの議論においては、「プランA」、「プランB」との仮称と、「フクシマ・クロージャー・プラン」という概念についてしばしば言及してきたが、その場合、さらに別の選択肢（プランC）も加わってくる。それらの比較を下表に示す。

表1：廃炉案の相互比較
(出典：筆者)

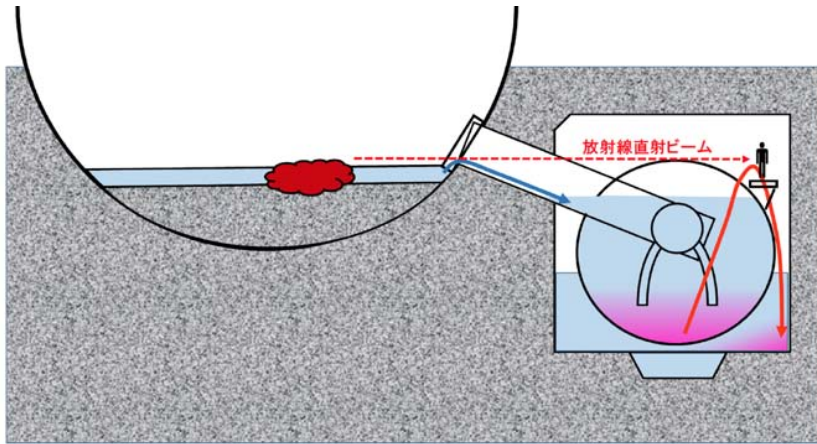
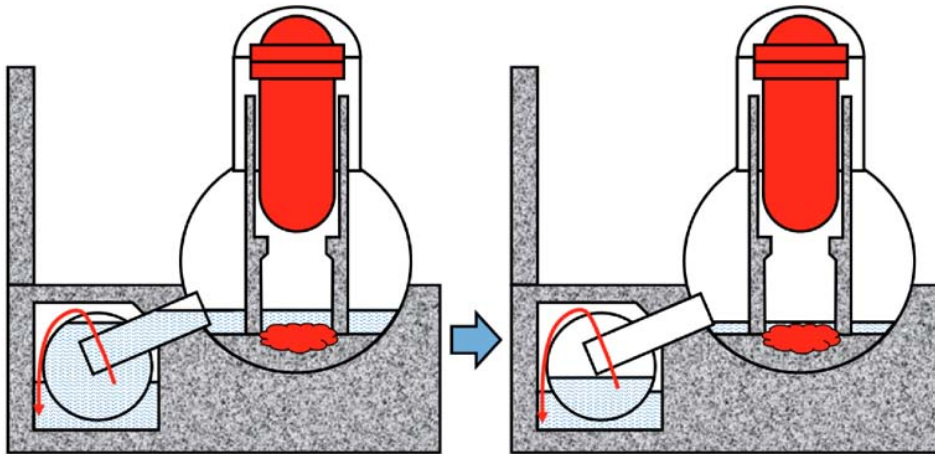
案 比較項目	プランA (TEPCO)	クロージャー・プラン (筆者)	プランB (TEPCO)	プランC (筆者)
状況	2018年に放棄	IRIDにより却下	NDF現行案	新提案
最終状態	緑地復旧	壕で隔離された ドライ・アイランド	緑地復旧 (?)	壕で隔離された ドライ・アイランド
目標工程	40年	40年 (最終処分施設)	40年	なし (最終処分施設)
地下水の遮断方法	凍土壁 +ポンプ揚水	壕	凍土壁 +ポンプ揚水	壕+建屋の気密・ 水密化
燃料デブリの冷却方法	水冷	空冷	判断保留	空冷
燃料デブリの回収方法	冠水 - 上アクセス 伸縮マスト	地下ホットセル 伸縮マスト	気中 - 横アクセス 多軸アーム	ヒューマノイド ヒト型運動
RPVの解体方法		未検討	未検討	除染後そのまま (一部解体)
PCV、原子炉建屋の解体	未検討	未検討	未検討	除染後そのまま (一部解体)
達成の難易度	極めて難 (不可)	難 (可)	著しく難 (未知)	易 (推定)
安全性/被曝	危険 (不可)	被曝線量小	被曝線量大	被曝線量最小

プランCの特徴は、全体的に「フクシマ・クロージャー・プラン」をベースとしている。ただし、両者の最も大きく異なる点は、40年のうちにすべての廃炉の実務を終えなければならないとの前提についてである。筆者は、この特別な条件の価値について検討してみたが、確かにこれをそのまま残しておくことには、作業関係者の緊張感を維持させるという一定の有益性もあるかもしれないが、反面、より良い案を排斥してしまうという有害性もあると判断した。いずれにしても重要なことは、仮にこの条件を罰則も伴う法的な要件にしたところで、結局できないものはできないということである。使用済燃料や燃料デブリは、首尾よくキャスク詰めされたところで、その先の行き場があるわけではない。そのまま敷地内に留まり続けるしかないのである。汚染した大量の土壌も同様に敷地内に留まり続けるしかない。プランCの中核的な考え方は、海外の先行プラントのように、通常の無制約、無条件の解放を無理に40年で達成することを目指すのではなく、福島第一原子力発電所に対する唯一現実的な土地の利用法である放射性廃棄物の貯蔵施設への転用を前提としていることである。これは、重大な後退であるかのように思われるかもしれない。しかし、敷地内の土地、建物およびその他の既設のインフラの効率的な活用と廃棄物の再利用を大幅に促進する案でもある。

この新たな目標に向かって、当面は放射性物質を閉じ込めるプロセスに傾注し、その期間中に進化が期待されるロボット技術を最大限応用してその後の燃料デブリを行うという構成となっている。したがって、プランC全体の構成要素は、以下となる。

地下水の流入対策	壕（ドライ・アイランド化。完成後、凍土壁は運転停止）
燃料デブリの冷却	空冷化（パッシブ設計）
放射性物質の外部環境への漏洩対策	滞留水の処理、原子炉建屋の気密性・水密性強化
放射性廃棄物の処理	ドライ・アイランドを利用したトレンチによる埋設処理
燃料デブリの回収	ロボット（ヒト型運動能力のあるヒューマノイド）の利用
既設建屋の処理	利用可能な建屋は廃棄物貯蔵施設に転用
敷地のセキュリティ	壕（柵よりも防御力が高い）

以上のうち、壕と燃料デブリの空冷化の概念については、すでに「フクシマ・クロージャー・プラン」の紹介で先に概説した通りであり、ここでは説明を繰り返さない。ただし、燃料デブリの崩壊熱はその後でも低下しており、最近の東京電力による評価では、2号機の場合で最大69kWとのことである。ドライウェルとサブプレッション・プール（トラス）に残されている大量の滞留水に対する処理法も「フクシマ・クロージャー・プラン」の中で説明しているが、まずは一旦これをトラス室に排水して量を減らす。この際、トラス室の放射線レベルが急上昇する可能性があるため、注意をしなければならない。また、トラスの気相部には、高い濃度の水素ガスが溜まっている可能性もあるため、それに対する注意も必要である。その上で、ドライウェルから吸引した湿った空気を圧縮して湿分を凝結させ、乾燥空気を戻す再循環運転を続けることによって乾燥させることができる。（次図参照）



滞留水を排出するときの
 注意点（トラス室の
 放射線量率上昇）

図 15：ドライウェルの排水・乾燥方法
 （出典：筆者）

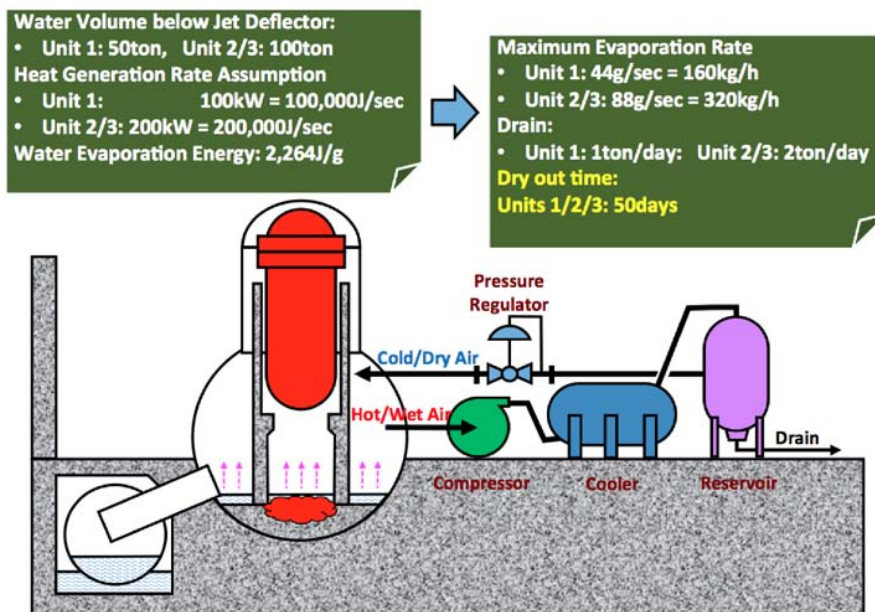


図 16：「フクシマ・クロージャー・プラン」において提案した滞留水処理の概念
 （出典：筆者）

プランCに対しては、2つの理由で抵抗もあるとは思われる。一つ目は、無制約、無条件の解放を諦める点である。しかし、福島第一原子力発電所の土地は、歴史的に元々農家の田畑だったわけではない。1941年には陸軍磐城飛行場だった土地で、戦後は国土計画興業に払い下げられて塩田とされるも、製塩事業は長くは続かず、その周辺の山林原野と共に、3.2km²もの広大な面積をたった5億円で東京電力が買収したものであった。特に今更戻す相手がいるわけでもない。

二つ目は、廃炉を事故発生に責任のある世代が完遂せず、次の世代に押し付けることの倫理的問題である。しかし、低い技術力で無理に挑み、その高コス

トの財源を得るために多額の国債が発行され続けているのであり、その返済が次の世代に押し付けられるよりは、むしろ今のうちに基金を蓄えておいてそれを引渡し、優れた技術で対処してもらう方が得策との見方もあるだろう。

以下では、ロボット（ヒト型運動能力のあるヒューマノイド）の利用と、原子炉建屋の気密性・水密性の強化、放射性物質を内包した建屋群の耐久性について議論する。

3.1. ロボット（ヒト型運動能力のあるヒューマノイド）の利用

1986年のチェルノブイリ原子力発電所4号機の事故対応には、消防士や兵士ら4,000人近くが投入され、「バイオ・ロボット」と称された。本来ロボットが担うべき危険な単純作業（高熱でくすぶっている高線量の黒鉛をシャベルですくって建屋の屋上から除去する作業など）を人間が行うことになったからである。というのも、当時はまだ、世界で最も先進的なロボットでさえも、このような単純な動作の作業さえこなすことができなかったのである。もし当時、今日のより進んだロボット技術が活用できていたならば、少数のロボットの集団によって、消防士や兵士らが受けた大量の被曝線量を減らすことができていたはずである。また、将来のロボット技術が当時活用できていたならば、彼らの誰も命を犠牲にすることはなかったかもしれない。

チェルノブイリ事故から35年が経ち、ロボット技術は、他の関連する科学技術の分野、すなわち材料科学、高密度・高容量バッテリー、人工知能技術、センサー技術などと共に飛躍的に進歩した。動力や信号用のケーブルが不要で、ヒトと同じ体格（身長、体重）をしたヒューマノイドが、凹凸面や雪道の二足歩行から、階段を駆け上がったり、前転、倒立、後方宙返りのようなアクロバティックな運動をしたり、ドアの開閉、弁のハンドルの開閉操作、電動工具の使用や配管接続といった複雑な操作や作業を行えるまでとなった。これらに、レーザー／プラズマ溶接／溶断が加わるのも時間の問題である。複数のロボットが連携して作業を行うこともできる。筆者が「フクシマ・クロージャール・プラン」で提案した伸縮マス

トや、NDFのプランBにある多軸ロボット・アームの如きは、今でさえすでに先端技術ではなく、いわんや、100年後、否50年後には、今そのような技術で危険な燃料デブリを回収しようと悩んでいることが、信じられないくらい幼稚な技術として哀れに思われることだろう。



画像1: Boston Dynamics (ATLAS)
<https://www.bostondynamics.com/atlas>

そもそも燃料デブリの回収が困難である唯一の理由はその強力な放射線であり、それさえなければ、50年以上前の道具を用いた人海戦術でも、半年か1年のうちにはきれいに除去できる作業のはずである。したがって、このような作業を、ヒトと同じような動作が可能で、放射線の被曝を怖れる必要のないロボット（ヒューマノイド）に担わせたならば、作業の能率と安全性は劇的に向上するはずである。

3.2. 原子炉建屋の気密性・水密性の強化

ヒューマノイド型ロボットの技術の進歩を待つ傍ら、その備えの中で最も重要なのが、原子炉建屋の気密性・水密性の強化で、それによって、水や空気を媒体に、放射性物質が外部環境に漏洩するのを防ぐことである。BWRプラントの原子炉建屋は、ドライウェルとサプレッション・プールが「一次格納容器」と呼ばれるのに対して、元々「二次格納容器」とも呼ばれているもので、ある程度の気密性を有し、設計事故に対する安全解析上も担保とされていた。しかし、原子炉建屋の気密性は、水素爆発によって完全に喪失してしまっていた。

一方、原子炉建屋の水密性とは言えば、これまた供用期間中の劣化か地震や地質学的な影響によって、原子炉圧力容器に注入した水が原子炉建屋地階に溜まるものの保水能力がなく床か壁から漏れ、これを取り巻く透水性の土壌が水脈となって原子炉建屋の下流側に位置するタービン建屋の地階で湧出している事実からも、劣化してしまっていることは明らかである。

原子炉建屋の地上階に対する気密性の回復は、漏洩のインパクトと作業性、検査性、メンテナンス性を考慮して、難度は低い。難度が高いのは、地階に対する水密性の強化の方である。壕によるドライ・アイランド化で地下水位が海面まで低下するのは、漏洩した放射性物質の移動を抑制する上で大いに有益ではあるが、長期的な視点から、原子炉建屋地階に対する水密性の強化は必須である。その場合、内側からこれを行う工法と外側から行う工法が考えられる。あるいはより万全にそれらを組み合わせ、両側から行うことも考えられる。

狭いX-6ペネではなく、X-2ペネから格納容器内に入り、アクセス経路にあるグレーチングや鋼材などの干渉物を撤去しながらペDESTAL底部のアクセス口まで進み、適当な掘削、切削用のツールを使って燃料デブリを回収して容器に入れるといった一連の作業を行うロボットによる作業班を編成させることができるようになるのは、飛躍した空想ではなく時間の問題なのであり、今はその到来を待ちながら、そのための備えをしておくことである。

内側から行う工法としては、予め化学除染などである程度放射線レベルを低下させておき、その後、地階を清浄な水で冠水してさらに放射線環境を改善し、ダイバーによって、表面処理を施してから水中エポキシ塗装を行う方法がある。この工法は、CANDU炉などの実際に漏洩している使用済燃料プールの補修方法として実績がある。この種のプロジェクトを行うために訓練され、認定されたダイバーは多数いる。一方、外側から行う工法としては、分割したステンレス鋼板をボルトと溶接によってパッチングしていく方法が考えられる。その場合、地下に対してはより困難が多いと予想されるが、長距離海底トンネルや大都市の中心部の地下鉄工事などに使われている今日の高度な土木技術、さらに最新の採掘掘削技術を応用すれば、十分可能であると思われる。したがって筆者は、内側からでも外側からでも技術的には可能と考える。

先にも述べたように、原子炉建屋の地上部分の気密性の復旧は、比較的容易である。この場合、「モジュール工法」が適用できる。まずは、屋外で鋼板とH鋼などを使って大型パネル（例えば15m x 15mほどのサイズ）を作り、地面に置いた状態で溶接部に対する検査を行って塗装を施す。次に大型クレーンを使って各パネルを組み立て、壁面と天井を覆う。それぞれのパネルを隣接するパネルに溶接し、最終的に巨大な角形の帽子を原子炉建屋に被せた形とする。これが地表のすぐ下のレベルで、ゴム系の樹脂を介し、原子炉建屋に密着して取り付けられる。この場合の鋼製パネルは、燃料デブリからの崩壊熱に対する最終的な放熱板ともなる。ただし、単位面積当たりの放熱量はせいぜい10W/m²程度にしかならないため、燃料デブリの熱による表面温度への寄与は無視し得る。



3.3. 放射性物質を内包した建屋群の耐久性

プランCでは、将来のロボット技術を駆使して燃料デブリを回収するも、その後に残る原子炉圧力容器（RPV）や格納容器（PCV）、原子炉建屋などを除染や汚染拡大防止の処置をした後、そのまま敷地内に留めることにしている。

そのように、一旦原子炉建屋の外表面が全面的に鋼製パネルで覆われ、ほこりの混じった風や酸性雨、雪や氷の付着、日射、その他の気象現象や微生物から保護されてしまえば、建屋の内部にあるコンクリートや鋼構造物の劣化は相当長い間起こることがないと考えられ、まして、除湿された乾燥空気という環境下においては、一層そのようであろうと考えられる。

放射線レベルは減弱し、崩壊熱も低下していく。一方、技術は進化する。その将来性を信じさえするならば、この負の遺産に対する処理法にも融通性と選択肢が期待されることだろう。

4. 結論、提言

最終状態

中長期ロードマップを発表するに際しては、目標とする最終状態について、だれもが同じ視覚的イメージが描けるよう明確にするべきであった。個人の想像力に委ねるべきではない。

標準的な原子力発電施設における場合と同じような緑地化が、事故の発生から40年後の福島第一原子力発電所において実現しているかのような幻想的な光景を、その最終状態のイメージとして誤解させ、欺瞞するべきではない。これが実現しないものと判断する根拠としては、以下の理由だけからでも十分である。

- ・ 敷地の放射線レベルを米国における緑地解放の基準である $40\mu\text{Sv}/\text{年}$ 以下、あるいは英国などの基準である $10\mu\text{Sv}/\text{年}$ 以下とするためには、膨大な体積（ $\sim 1,000\text{万m}^3$ ）の汚染土壌を除去して廃棄しなければならないことになるが、それは物理的に著しく困難な作業規模であり、そもそも敷地外にはその受け入れ先がない。
- ・ 敷地内には、焼却などによる減容化をしても、10数棟の巨大な建屋に保管された放射性廃棄物が残されるが、その量が膨大な体積であるために、敷地外には受け入れ先が期待できない。この物量の推定には、1～6号機の施設を解体することによって発生する廃棄物の量が含まれていない。
- ・ 仮に1～6号機の施設を完全に解体した場合には、さらに膨大な量（150～200万トン）のコンクリート瓦礫とスクラップが発生することになるが、それらに対する敷地外での受け入れ先が期待できない。
- ・ 敷地内には、使用済燃料や高線量の炉内構造物、使用済制御棒、チャンネル・ボックスなどを保管した乾式キャスクや遮蔽容器、汚染水処理で発生した二次廃棄物などが残されるが、それらの処分法が決定され施設が稼働するまでの期間は、敷地外での受け入れ先が期待できない。仮に1～3号機からの燃料デブリが回収された場合には、それらの収納容器についても同様。

福島第一原子力発電所に対する緑地化を唯一最善の目標と見做し、これに向けて多大な無理と資源の浪費を正当化するべきではない。福島第一原子力発電所の敷地に対する最も現実的な将来の土地利用は、好むと好まざるとに拘らず、放射性廃棄物の処理施設である。上述したあらゆる問題は、この現実を受け入れることによって自動的に解決する。

「気中一横アクセス工法」による燃料デブリの回収

多軸式のロボット・アームによるX-6ペネからのペDESTAL内側へのアクセスによる回収は、2号機において、サンプルを少量採取するだけのパイロット試験としては達成可能と思われる。しかし、X-6ペネを拡張して本格規模に進んだ場合には、回収がアクセスの容易な範囲だけに限られ、原子炉圧力容器の内部に残存しているものなどが放置され、最終的には、よりフレキシブルでアクセス性の良い、かつ、より効率的で生産性のよい工法に変更しない限り成功が見込まれない。掘削、切削、研削などによる回収を湿式工法で行う場合には、高濃度の α 核種の汚染水を発生させ、乾式工法で行う場合でも格納容器内部の全体を α 核種で汚染させることになり、それらの弊害への対処が必要になる。

パイロット試験を完遂したとしても、燃料デブリの性状に関して得られる情報は限定的で不完全であり、それほど有益であるとは思われない。ロボット・アームによる「気中一横アクセス工法」の適用はせいぜいこの試験に限定し、そのまま拡大することで本格作業の規模への適用を目指して進むべきではない。

燃料デブリの冷却方法と汚染水対策

燃料デブリの冷却に水を使用し続ける限り、その中から放射性物質が溶出して汚染水が生産され続ける。原子炉建屋とタービン建屋の遮水を能力の不完全な凍土壁に依存し続ける限り、地下水の流入を止めることができず、降雨量による変動を伴いながら、汚染水は増え続ける。このような状態を断ち切る方法として、まずは燃料デブリの冷却を水冷から空冷に切り換え、遮水の方法も凍土壁から壕に切り換える。

壕によって阿武隈山地が水源となる地下水流が遮断され、隔離された敷地の地下水レベルは、最終的に海水面まで低下する。そのため、原子炉建屋とタービン建屋への地下水の流入は、劇的に減少するものと期待される。

ある。これは、燃料デブリからの崩壊熱を放散させるのに、自然の熱伝導、対流、輻射にのみ依存した方法である。

プランC

廃炉計画は、汚染水の発生抑制、燃料デブリの冷却、燃料デブリの回収、放射性廃棄物の処理を、独立した要素と見做すのではなく、相互に関連性のあるパッケージと捉え、最終的に達成しようとする敷地の最終状態に照らして策定されるべきである。代案としてのそのような廃炉計画のパッケージは、本書においてはプランCと称され、以下の構成要素からなる。

地下水の流入対策	壕（ドライ・アイランド化。完成後、凍土壁は運転停止）
燃料デブリの冷却方法	空冷化（パッシブ設計）
放射性物質の外部環境への漏洩対策	滞留水の処理、原子炉建屋の気密性・水密性強化
放射性廃棄物の処理方法	ドライ・アイランドを利用したトレンチによる埋設処理
燃料デブリの回収方法	ロボット（ヒト型運動能力のあるヒューマノイド）の利用
既設建屋の処理方法	利用可能な建屋は廃棄物貯蔵施設に転用
敷地のセキュリティ	壕（柵よりも防御力が高い）

壕は無動力のパッシブ設計の設備であるため、そのメンテナンスとしては、流入する土砂に対する定期的な浚渫が必要になる程度である。これがひとたび完成することで、地下水位が海水面まで低下し孤島と化した敷地には、幾つかの利用法と利点が期待される。放射性廃棄物を埋設処理するためのトレンチは、そのような利用法として有望な一つの候補であり、地下水の流れがなくなることで、土壌の中での放射性物質の拡散が抑制されることは、そのような重要な利点の一つである。燃料デブリの空冷化も、無動力、メンテナンス・フリーの設備として設計することが可能で

お問い合わせ：kouhou@greenpeace.org

免責事項

本報告書に記載されている見解および推定は、必ずしも委託者（グリーンピース・ジャパン、グリーンピース・東アジア・ソウル事務所）の見解を示すものではなく、執筆者の見解を示すものです。

本報告書は、情報共有、環境保護、公共の利益を目的としたものであり、投資やその他の意思決定プロセスの参考にするものではありません。したがって、投資やその他の意思決定プロセスの参考として使用すべきではありません。このように使用された場合、グリーンピースはそのような使用から生じるいかなる責任も免除されます。グリーンピース・ジャパンは、本報告書に含まれる情報の迅速性、正確性、完全性を保証するものではありません。

ご質問やコメントがある場合は、kouhou@greenpeace.org までご連絡ください。