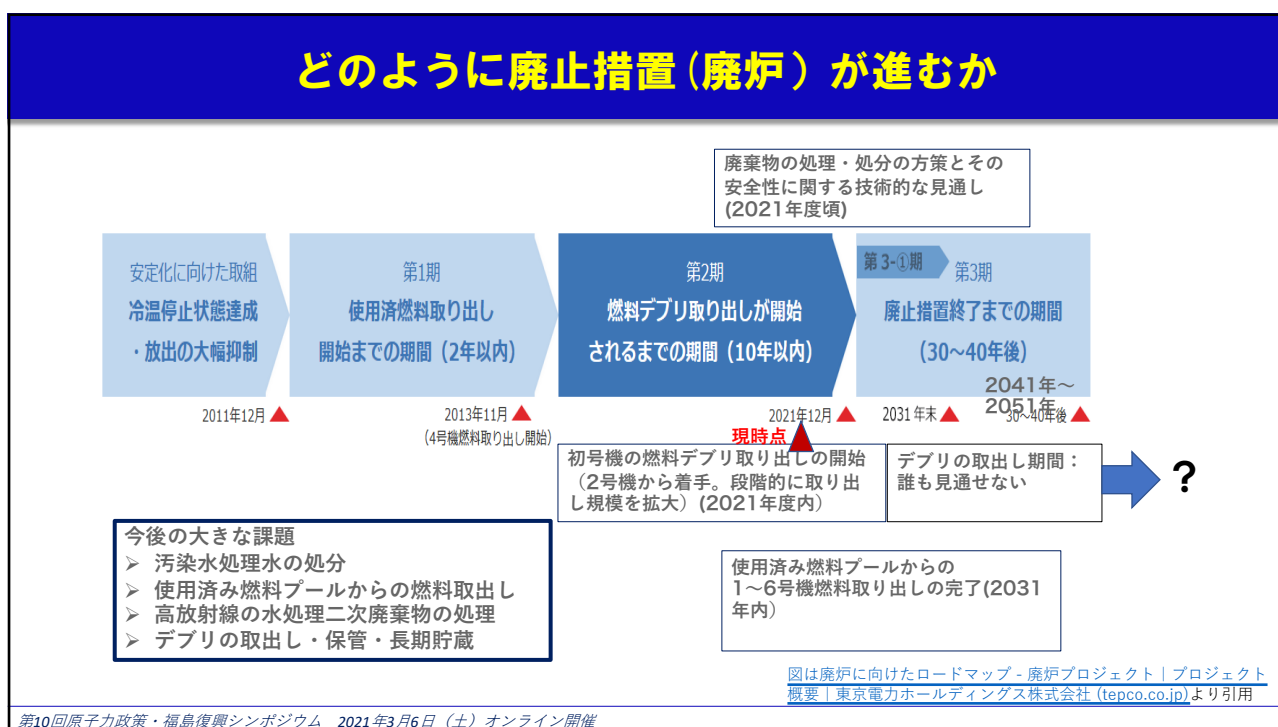




1



2

エンドステートは描けない(現在)

IAEA等はエンドステートを決めよと言っているが

● 1Fの廃炉 最終の姿は(エンドステート)？

- 溶融デブリがどこまで取出すことができるか
- デブリを含めた廃棄物の最終処分はどのような姿か(どこに、どんな形で)

上記項目が決まらない限り、現状では技術的にもエンドステートが描ける状況ではない

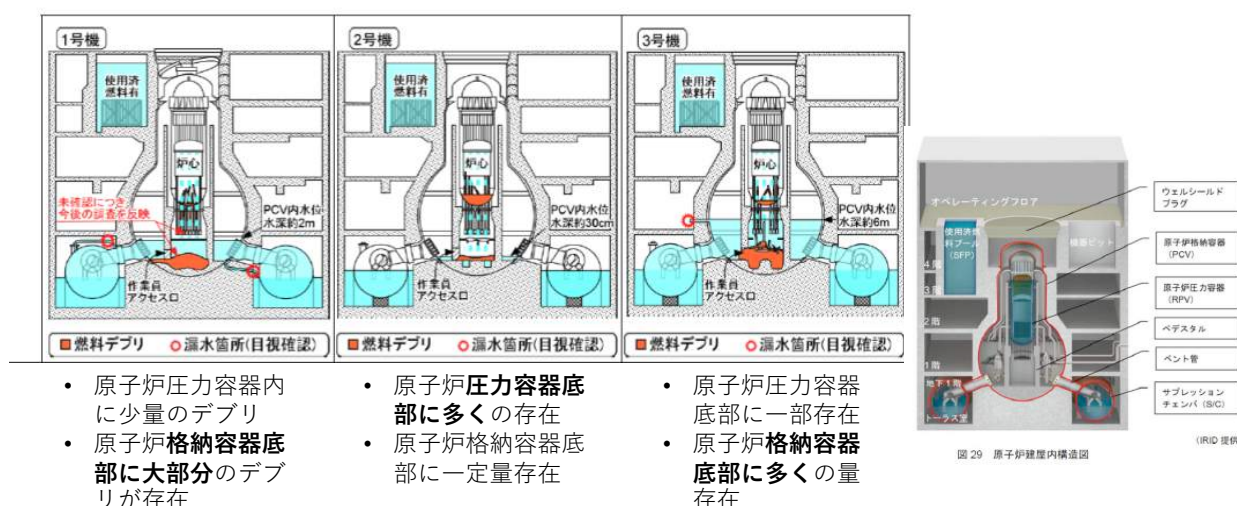
何故か？ デブリ取出しにはどんな課題があるか

第10回原子力政策・福島復興シンポジウム 2021年3月6日(土) オンライン開催

3

1F 1～3号機のデブリ姿(推定)

- デブリ存在の全体像がつかめていない -



第10回原子力政策・福島復興シンポジウム 2021年3月6日(土) オンライン開催

4

1F 1～3号機のデブリの推定量

	1号機	2号機	3号機	合計
燃料集合体数(体)	400	548	548	1496
集合体重量(トン)	約120	約164	約164	約448
核燃料重量(トン)	約69	約94	約94	約257
推定デブリ重量(トン)	約279	約237	約364	約880

技術研究組合国際廃炉研究開発機構「燃料デブリに迫る」IRIDシンポジウム2017 in いわき、2017年8月3日より引用

第10回原子力政策・福島復興シンポジウム 2021年3月6日(土) オンライン開催

5

デブリ(極めて強い放射性物質) 取り出しにはどんな課題があるか

デブリの存在・性状

- ・ デブリの存在場所の全体像がつかめていない (ごく一部遠隔により視認)
- ・ デブリの性状・形態(一様ではない)の把握: 種々の化学的、物理的形態
- ・ デブリの冷却、臨界管理; いつまで継続が必要か?

取出し方策

- ・ どのように、どこから取り出すか; 炉心横、上部からが取出し案となっているが最適な取出し方法は
- ・ 取出し可能な重量、大きさへの切断 (1回の取出しでは数十キログラムまでか)
- ・ どれだけ取り出せるか; 全量取出しが可能か
- ・ 取出しに長期間かかるがその期間を見通すことができない

取出し施設、保管

- ・ 取出したデブリをどのように処理、貯蔵、処分するか; 安定な長期貯蔵方策とは
- ・ デブリ取出し時(切断時等)の放射性物質飛散防止対策、強放射線場、強放射能のデブリの扱い: ホットセルの設置が不可欠

第10回原子力政策・福島復興シンポジウム 2021年3月6日(土) オンライン開催

6

デブリ取り出しは長期にわたる事業(数十年～)

原子炉内作業 (視野、空間尤度が少ない中)

- ・ **性状把握**：デブリの状態の把握 (サンプル採取?)
- ・ **切出し**：一度には最大数十kg程度か
- ・ **収納**：(水分の除去)、収納容器に格納

炉内から運び出し (輸送)

近接(隣接)する建屋(ホットセル)内での作業

- ・ **水分の除去**
 - ・ ウラン、プルトニウム量の測定(計量管理)
 - ・ 長期保管用の収納缶に収納
- (ここまですると外部から比較的アクセスが容易になる)

保管施設への輸送、長期貯蔵 (処分)

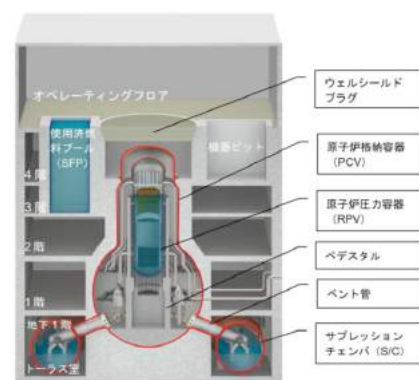


図 29 原子炉建屋内構造図

放射線量が極めて強いため人が直接アクセスできない
(ほとんどが遠隔操作やロボットによる作業)

第10回原子力政策・福島復興シンポジウム 2021年3月6日(土) オンライン開催

7

廃止措置・デブリ取り出しのポイント

今どのような方針で進めるのか (40年以上 更なる長期にわたる大事業)

・柔軟性を持った計画、事業

- 新規、革新的な案・アイデアを柔軟に取り入れることができること
- 国内外の有知見組織が事業に入りやすいこと
(複々線路線)

・全体の最適化

- デブリの取出しに大きな焦点が当たるが、それ以外にも1F全体の廃炉に関する多くの課題在り
- 1Fを含めた尤度ある土地の確保(デブリ取出しに伴う追加建物や設備の建設が必要)

第10回原子力政策・福島復興シンポジウム 2021年3月6日(土) オンライン開催

8

エンドステート(最終的な姿)はどこか？

**福島復興を大前提として
どのような形にするのが望ましいか、どのような形になりうるのか**

エンドステートの姿 (IAEA Safety Guide) :

- 完全解体(規制基準から外しグリーンフィールドに戻す)
- 制限付き利用：放射線被ばくの安全基準を満たした上での制限付き利用
- 事故炉等の場合：放射線防護対策を施した上、そのまま埋設

1Fのエンドステート： 現状では提示することは困難(社会的、技術的に)

では？

中間ステートの提示

第10回原子力政策・福島復興シンポジウム 2021年3月6日(土) オンライン開催

9

中間ステートとは (安全・安心を持ってもらうために)

中間ステート：顕在化しているリスクがひとまず安心できる状態

即ち、汚染水処理二次廃棄物やデブリを含めた廃棄物が安定な状態で長期間保管できる状態

中間ステート 1 :

- デブリを除いた廃棄物が安定、安全に長期間保管できる状態
- デブリについては現位置で安全(冷却、放射線遮蔽構造体の設置、放射性物質の漏洩防止、耐震)に維持できる状態

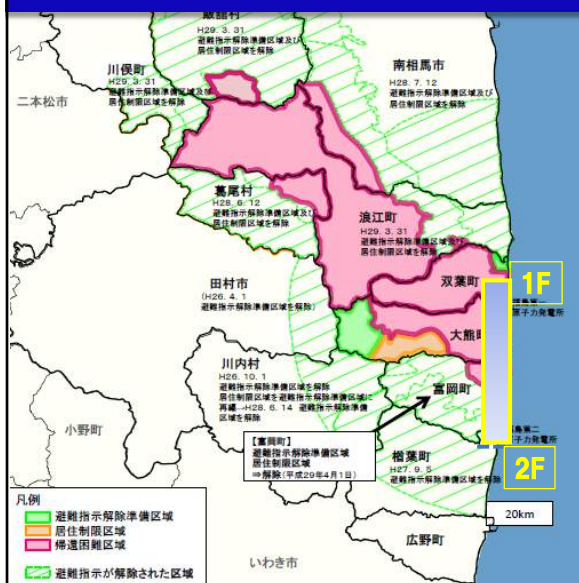
中間ステート 2 :

- デブリを炉心から取出し収納容器等に封入して長期間安全に保管管理できる状態

第10回原子力政策・福島復興シンポジウム 2021年3月6日(土) オンライン開催

10

終わりにあたって — 1F～2Fへの産・知・和の集積 —



まず、

1Fと2Fを取囲んでいる中間貯蔵施設の一体的運用

次に、

1F～2Fにわたる領域（1Fと2Fの距離：十数キロ）の発展

- **産業集積**：廃炉事業、革新的産業の集積、エネルギー産業等
- **知の集積**：廃炉関連研究開発、教育施設
- **和の充実**：コミュニティ施設、伝承・アーカイブ施設、親子広場、憩い

1F敷地：348.5ha
中間貯蔵施設敷地：約1600ha

第10回原子力政策・福島復興シンポジウム 2021年3月6日（土）オンライン開催

第10回原子力政策・福島復興シンポジウム(2021年3月6日)
 東日本大震災と福島原発事故から10年
 ～1F廃炉の将来像と『デブリ取り出し』を考える～

福島第一原子力発電所(1F)廃炉の将来像と
 「デブリ取り出し」を考える

研究開発の視点から

東京大学 原子力専攻
 日本原子力研究開発機構 GLADS

岡本 孝司

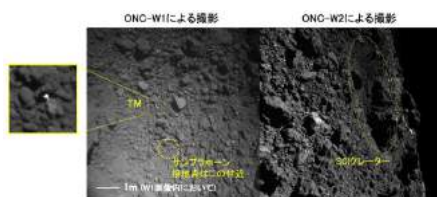
okamoto@n.t.u-tokyo.ac.jp

1

Fukushima Challenge

- ・ 福島第一を安全に片付ける事
 - － 現在の福島第一は放射性廃棄物の塊
 - － 福島第一内部に存在するリスクの高いデブリを取り出して、安全に管理する
 - － 大量の放射性廃棄物を処理し安全に管理する

ハヤブサ2／リュウグウ調査



http://www.hayabusa2.jaxa.jp/topics/20190726_TD2_images/
 JAXA、千葉工大、東京大、高知大、立教大、名古屋大、明治大、会津大、産総研

福島第一／2号機格納容器内調査



<https://photo.tepco.co.jp/cat2/03-j.html> 東京電力ホールディングス

2

2

原子カライフサイクル

• 廃止措置とは

- 放射性物質という「リスク」を内包しているシステムを解体し、
- 放射性物質を廃棄もしくは管理下におくとともに、
- 発電所自体からは、放射性物質による被ばくもしくは汚染のリスクを無くすこと

• 廃止措置においても、安全の基本的考え方は変わらない

- 深層防護の考え方
- 重要度分類(リスクの高いものに集中)
- 継続的改善(経験の反映、被ばく低減、リスク低減)

但し、運転中とはリスクがけた違いに小さいことに注意
(使用済燃料が取り出されたら、廃棄物)

3

3

廃止措置の分類

• 廃止措置(原子炉/再処理施設等を含む・事故炉以外)

- Decommissioning and Dismantling (D&D)
- 放射性物質(燃料を含む)が管理下にあり、リスクが低い。
- 安全に放射性物質を取り出して処理処分する。
- **すでに実証された技術**
- マネジメント (現有手法の組み合わせ)

• 廃炉(事故炉・福島)

- Fukushima Challenge
- 分散した放射性物質を、一応の管理下。燃料は不明
- **新しい技術開発を進めることが必要**
- マネジメント (新規技術と既存技術の組み合わせ)
- トライアンドエラー

4

4

通常原子力施設廃止措置のカギ

- ① 研究ではなくプロジェクトマネジメント(Management)
 - 既存技術の組み合わせである
 - 順番や手法を間違えると、大幅にリスクが増える
 - 放射性物質の取り扱いは重要であるが、マネジメントの中で考えることが必要。
 - 基金化と専門組織化
- ② リスクに応じた対策(Graded Approach)
 - お金を掛けたり、先送りすれば安全になるものではない。
 - 安全を最優先するとともに、廃棄物物量を最小化する
- ③ 低レベル廃棄物処分場が必須
 - 10年程度の長期的視野で処分場建設
 - 廃棄物物量を見越した政策が必要

5

5

燃料損傷事故を起こした炉の廃止措置

- TMI-2
 - 燃料取り出しに10年以上
 - 現在は燃料が取り出され、格納容器や建屋による密封管理状態でリスクは十分に低い
 - 即時解体を進める可能性が高い
- チェルノブイリ
 - 燃料は空冷
 - 新ドーム(閉じ込め)による安定保管で、リスクは低減された状態
 - 具体的な解体は将来検討

6

6

福島第一原子力発電所の現状

- 燃料の状況
 - 止める、冷やす、水素を管理
 - ガスサンプリングによる核分裂監視と必要に応じホウ酸水注入
 - 循環注水により崩壊熱除去と温度計による監視
 - 窒素注入により水素濃度低減と濃度監視
- 閉じ込めの状況
 - 1号機: 格納容器、がれき除去、使用済燃料取り出し準備
 - 2号機: 格納容器、原子炉建屋、使用済燃料オペフロ経由
 - 3号機: 格納容器、使用済燃料取出ほぼ終了
 - 4号機: 使用済燃料排出済／通常炉廃止措置に近い状況
 - 汚染水: 封止(モニタリングで確認)
 - 固体廃棄物: 敷地内仮保管(がれき、樹木、汚染水フィルタなど)

7

7

時間との闘い

- 燃料など極めて高いリスク
 - 現状は閉じ込めがある程度できている。
 - 原子炉建屋や格納容器の経年劣化により、長期的には閉じ込め性能が確保できなくなる
 - 超巨大地震や超巨大台風による閉じ込め性能破壊の可能性
 - 先送りはリスクを増大させる
- 燃料を安定化させる事が最も重要
 - 閉じ込めを確保しつつ、可能な限り早急に取り出す
 - 閉じ込め性能を強化する

8

8

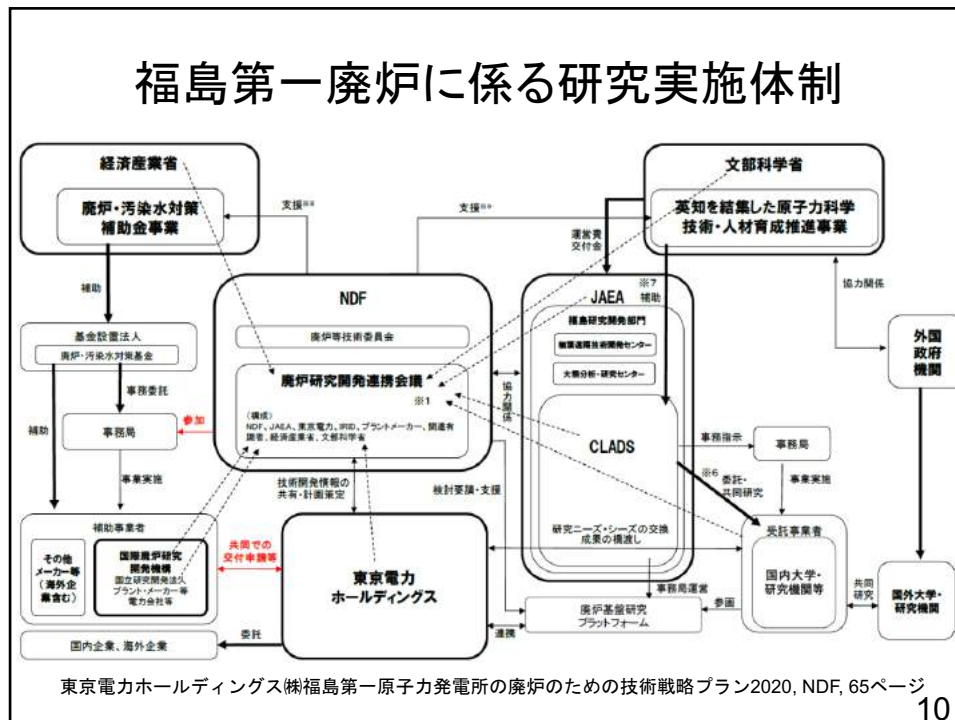
福島第一廃炉における リスク管理の特徴

- 通常の原子炉と同様のマネジメントでは危険
 - 例えば、リスクのわずかな増大も許さない工事を行うと、結果的にリスクの大きな増大を招く。また、時間的な先送りがリスク増大につながる。
- 現場を中心とし、時間・空間・対象（放射性物質）を考慮した、**俯瞰的なリスク管理**を実施する必要
 - 数多くの作業が相互に関連している。
- 5年、10年と長期に掛かる廃炉を見越し、俯瞰的な管理のできる人材を戦略的に養成

9

9

福島第一廃炉に係る研究実施体制

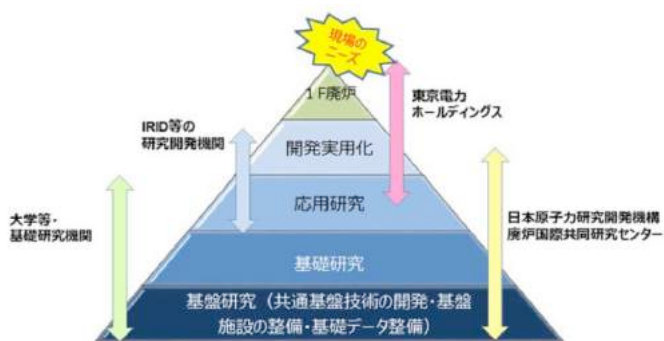


10

10

NDF 廃炉研究開発連携会議

東京電力福島第一原子力発電所の廃炉・汚染水対策に係る各機関で進められている様々な研究開発を、実際の廃炉作業に効果的に結び付けていくこと

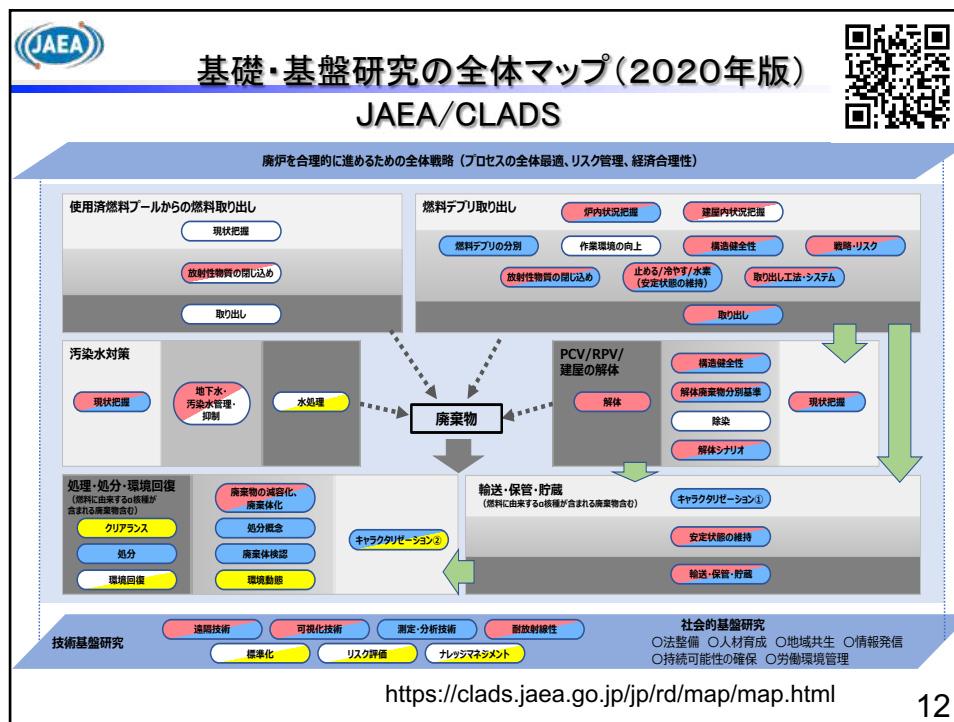


経済産業省
文部科学省
NDF
東京電力
IRID
メーカー
JAEA
大学
学会など

東京電力ホールディングス㈱福島第一原子力発電所の廃炉のための技術戦略プラン2019, NDF, 78ページ

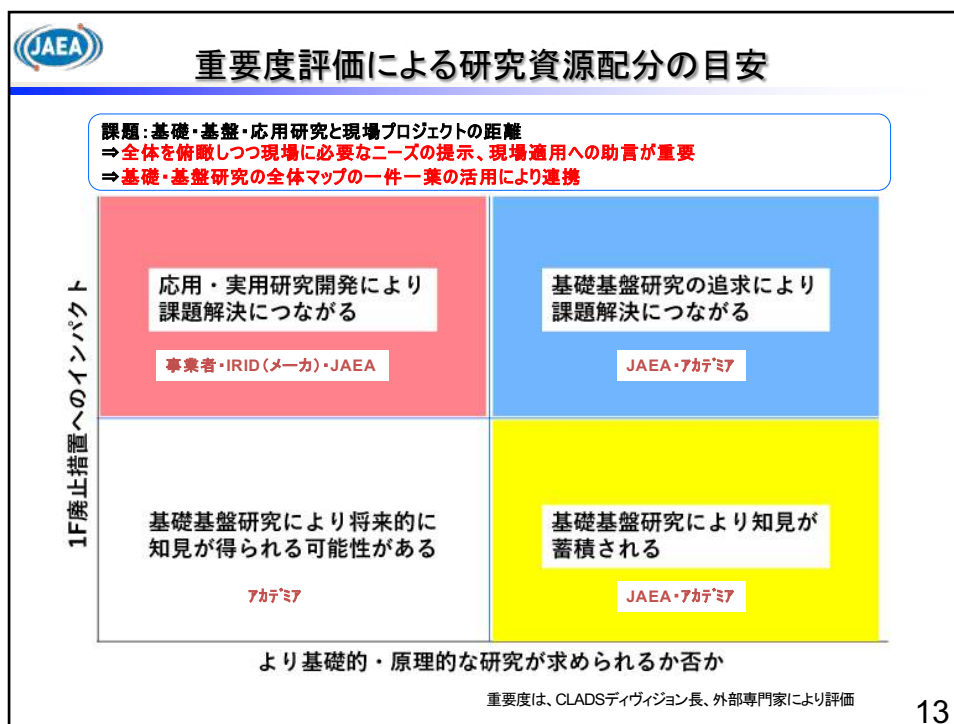
11

11



12

12



13

13

Fukushima Challenge

- 廃炉に関する基礎基盤研究の拡充
 - － 放射線や核燃料に関連する基礎基盤研究
 - － 放射線を束縛条件とする、工学の基礎基盤研究
 - － プランB、プランCを見据えた基盤研究
 - － 過酷事故研究
- 社会科学的視点の研究
 - － 風評被害のメカニズム
 - － 合意形成とリスク認知
 - － 情報学的アプローチ
- 人材育成は曲がり角に来ている。
 - － 今年の大学新入生は、事故当時小学2年生
 - － 福島を知らない学生が増えている。

14

14



第10回原子力政策・福島復興シンポジウム

1F廃炉の将来像と「デブリ取り出し」を考える － 社会的側面から －

松岡 俊二

早稲田大学レジリエンス研究所(WRRI)所長
早稲田大学ふくしま広野未来創造リサーチセンター長
早稲田大学国際学術院・大学院アジア太平洋研究科教授

smatsu@waseda.jp

2021年3月6日

1

「中長期ロードマップ」と1F廃炉

1. 「中長期ロードマップ」(第5回改訂版, 2019年12月27日)

【第3期】第2期終了～廃止措置終了まで(目標はステップ2完了から30～40年後)

2. 「廃炉の大切な話 2020」

■ 廃炉作業は30～40年かけて安全着実にやっていきます。



■ 廃炉全体の工程



2

2

1F廃炉の将来をめぐる議論

2. 福島県、双葉町・大熊町

・ 福島県：「使用済燃料や燃料デブリを含む放射性廃棄物については、発電所構内に恒久的に保管されることのないよう、処理・処分に関する目標工程を具体的に示すとともに、国及び事業者の責任において行われる廃炉対策の一環として処分方法を検討・決定し、県外において適切に処分すること」（福島県「意見」2019年12月）

・ 大熊町長、双葉町長：1F廃炉の完了後は「更地に戻すべきだ」（2020年12月）

3. 原子力専門家

・ 原子力規制委員会・初代委員長：「30～40年後の廃止措置終了」に対し、「それできません。30～40年後は誰も責任がないから、そう書いているだけです」、「更地になるようなイメージを持っている人がいるかもしれませんが、更地にはできません。敷地の一部は立ち入りができるようになるかもしれませんが、原子炉建屋のまわりはほとんど人が立ち入りできない土地になると思います」、「できないことは、できないんです。デブリを取り出して更地になるようにというのは罪だと思います」（2020年11月）

・ 原子力規制委員会・第2代委員長：「（更地という）あまりに非現実的なものを将来像かのように語るの、人をだますことになる」、「地元が更地を願うのは当然のこと」であるが、「（廃炉の）最終形を考えるより、今は目の前の状況を一步一步、次の段階に進めることが大事だ」（2020年3月）

3

3

1F廃炉の将来を決める「デブリ取り出し」

1. 「中長期ロードマップ」（第5回改訂版、2019年12月27日）

- ・ 2号機を初号機とする
- ・ 2021年内に2号機の燃料デブリ取り出しを開始し、段階的に規模を拡大

→ 新型コロナによる、イギリスでの特殊鋼製ロボットアーム（長さ約22m、重さ約4.6t）の開発の遅れから2021の「デブリ取り出し」の開始は不可能に。



4

4

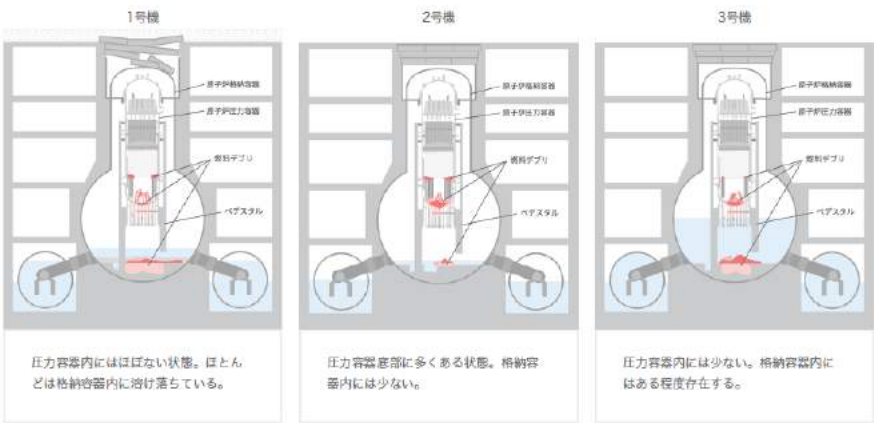
1Fの1号機(46万kW)、2号機(78.4万kW)、3号機(78.4万kW)のデブリ量の推定

	1号機	2号機	3号機	合計
燃料集合体数(体)	400	548	548	1496
集合体重量(トン)	約120	約164	約164	約448
核燃料重量(トン)	約69	約94	約94	約257
推定デブリ重量重量(トン)	約279	約237	約364	約880

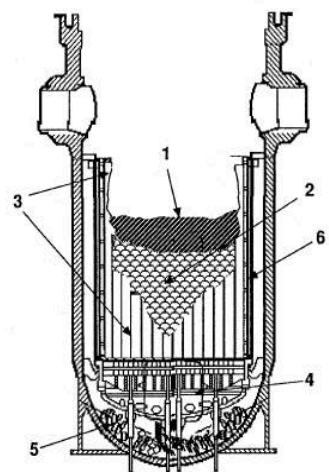
	ton					
分類	1-6号機	他の施設	水処理施設	廃棄物処理/貯蔵施設	サイト修復	合計
燃費デブリ	644	0	0	0	0	644
HLW	2042	0	0	0	83	2125
TRU	0	0	16	0	830	846
L1	100,135	104,543	310	1,050	76,030	282,068
L2	429,462	329,364	38,174	200	1,424,600	2,221,800
L3	951,309	2,825,634	151,320	26,325	1,375,000	5,329,588
合計	1,483,592	3,259,541	189,820	27,575	2,875,543	7,837,071

HLW：高レベル放射性廃棄物相当 TRU：TRU廃棄物相当
L1：放射能レベルが比較的高い廃棄物 L2：放射能レベルが比較的高い廃棄物 L3：放射能レベルが極めて高い廃棄物

1Fの1号機、2号機、3号機のデブリ位置の推定



スリーマイルアイランド原発2号機のデブリの位置と量

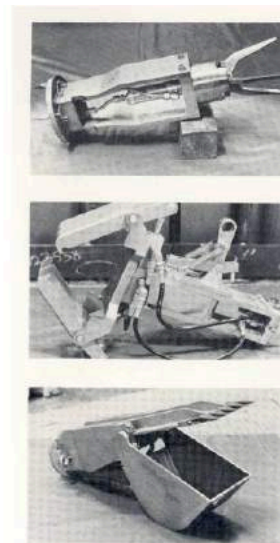


ZONE	DESCRIPTION	ESTIMATED QUANTITY (Kg)
1	Upper Debris Bed	26,000
2	Resolidified Mass	33,000
3	Intact Assemblies (Partially or Fully Intact)	45,000
4	Lower CSA	6,000
5	Lower Head	19,000
6	Upper CSA	4,000
TOTAL		133,000

7

7

TMI-2の「デブリ取り出し」作業と工具

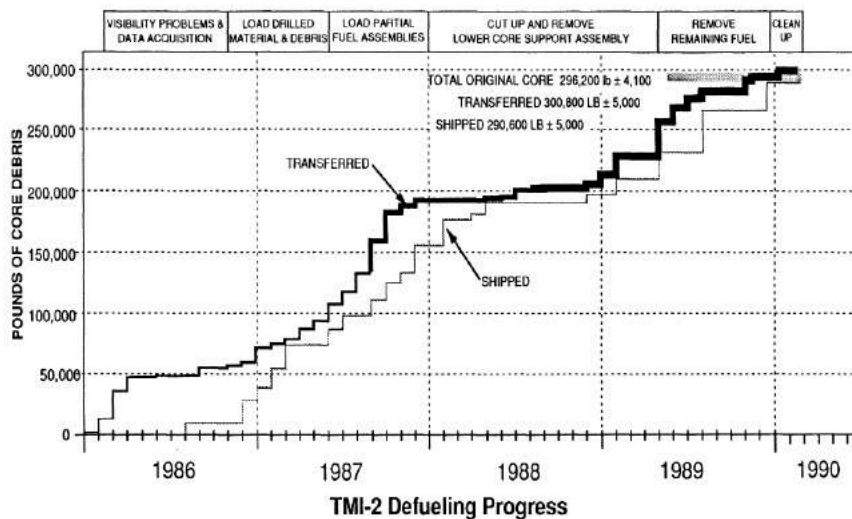


8

8

TMI-2の「デブリ取り出し」プロセス

1985年10月30日～1990年1月30日



9

9

TMI-2の「デブリ取り出し」と1Fの「デブリ取り出し」

EPRI (1990), *The Cleanup of Three Mile Island Unit 2: A Technical History: 1979 to 1990*, 382 pp.

GPU Nuclear (1990), *TMI-2 Defueling Completion Report*, 282 pp.

1. TMI-2 (PWR, 96万kW) の「デブリ取り出し」
「デブリ取り出し」作業 : 1985年10月30日～1990年1月30日 (4年3ヶ月)
取り出したデブリの量 : 296,200ポンド (134,354kg)
残ったデブリの量 : 1,125kg (核燃料 : 900kg)
年間労働日を260日 (21.7日/月) と仮定すると
1日当たりのデブリ取り出し量は、 $134,354\text{kg} \div 1,105\text{日} = 121.6\text{kg/日}$
2. 1Fのデブリ取り出しの歳月の推定
1Fデブリ量を880tと仮定、 $880,000\text{kg} \div 121.6\text{kg/日} = 7,237\text{日}$ (28年)
ロボットアーム1回/日で50kgと仮定、 $880,000 \div 50 = 17,600\text{日}$ (68年)
ロボットアーム1回/日で20kgと仮定、 $880,000\text{kg} \div 20\text{kg/日} = 44,000\text{日}$ (170年)

10

10

1F廃炉の将来像と「デブリ取り出し」

1Fの社会的価値を見直し、1F廃炉の将来像を技術的側面と社会的側面を総合して再検討し、多様な1F廃炉の将来の選択肢を示し、地域社会と対話することが求められている。

1. 原発事故の教訓を将来世代へ継承するため、技術的にも社会的にも最大限の工夫・努力をして、出来るだけ現在の状態の事故炉を保存する「1Fの将来の姿(End State)」。
2. 「デブリの取り出し」に最大限の努力をするが、全ての「デブリの取り出し」は技術的・社会的に難しいので、消極的にある程度の事故炉の構造物を残さざるを得ない時の「1Fの将来の姿(End State)」。
3. ①案と②案との折衷案として、「デブリ取り出し」は行うが(例えば、デブリ全量900 tのうち3分の2程度の600 tの取り出しを目標とする)、あまり無理をせず、ある時点まで「中間ステート(Interim State)」として、100年程度は安全貯蔵を行う「1Fの将来の姿」。1FのEnd Stateの姿は、さらに100年後の将来世代の決定に委ねる。
4. 巨額の資金・資源を投入して、あくまでも1Fオンサイトの全て(348.5ha)をグリーンフィールドにする「1F更地案(End State)」。

11

11

2050年の福島浜通り地域

ふくしま浜通り社会イノベーション・イニシアティブ(新SI構想)

社会イノベーション・シナリオ(SI)は2050年に、常磐炭鉱(いわき)、広野火力(広野)、2F(楢葉・富岡)、1F(大熊・双葉)、アーカイブ拠点施設(双葉)、復興祈念公園(双葉・浪江)、原町火力(南相馬)と南から北へ続く「エネルギー産業遺産・原発事故遺産・震災復興施設のネットワーク」を作り、1Fやエネルギー遺産群を核とした地域アートを展開することで地域の新たな魅力づくりをし、国際的芸術・学術拠点を形成することで、21世紀のレオナルド・ダ・ヴィンチを育成する。

- ① 1Fの事故遺産・記憶遺産としての活用を前提としたエネルギー産業遺産・原発事故遺産・震災復興施設のネットワーク形成(1F Heritage 構想)
- ② 地域アートなどの展開による新たな地域の魅力や価値の創造による交流人口の拡大と地域循環のための広域地域経営制度の形成
- ③ 福島教訓を未来世代へ発展的に継承し、福島県浜通り地域を新たな文化創造と文化発信地域として再生するための国際芸術・学術(Arts & Sciences)拠点の形成



12