

Mon. Mar 28, 2016**Room D**

Planning Lecture | Technical division and Network Session | Operation and Power Division

**[TN12] Various Efforts toward Restarting
Operation of Unit 1 and 2 of Sendai
Nuclear Power Station, and Technical and
Institutional Issues of the Regulation for
40-year Operation of Nuclear Power
Plants**

Chair: Yoichiro Shimazu (Fukui Univ.)

1:00 PM - 2:30 PM Room D (Lecture Rooms B B104)

**[TN1201] (1)Various Efforts toward Restarting
Operation of Unit 1 and 2 of Sendai Nuclear
Power Station**

* Kazutoshi Eto¹ (1.Kyushu Electric Power)

**[TN1202] (2)Institutional Issues of the Regulation for
40-year Operation of Nuclear Power Plants**

* Yoshihiro Nishiwaki¹ (1.IAE)

**[TN1203] (3)Technical Issues of the Regulation for 40-
year Operation of Nuclear Power Plants**

* Tadashi Narabayashi¹ (1.Hokkaido Univ.)

Room I

Planning Lecture | Over View Report | Over View Report 5

**[OV05] Argument of criteria for scientifically
preferable areas on HLW Geological
Disposal**

Chair: Yuichi Niibori (Tohoku Univ.)

1:00 PM - 2:00 PM Room I (Lecture Rooms B B200)

**[OV0501] Interim report of criteria for scientifically
preferable areas on HLW Geological Disposal**

* Osamu Tochiyama¹, Akiomi Shimada², Akira
Deguchi³ (1.NSRA, 2.METI, 3.NUMO)

Room J

Planning Lecture | Technical division and Network Session | Nuclear Data Division

**[TN13] Transport of muons in matter and their
interdisciplinary applications**

Chair: Yukinobu Watanabe (Kyushu Univ.)

1:00 PM - 2:30 PM Room J (Lecture Rooms C C102)

**[TN1301] (1)Applications of muons to atomic energy
fields**

* Teiichiro Matsuzaki¹ (1.RIKEN)

**[TN1302] (2)Nondestructive elemental analysis with
negative muons**

* Kazuhiko Ninomiya¹ (1.Osaka Univ.)

[TN1303] (3)PHITS simulation for transport of muons

* Shin-ichiro Abe¹ (1.JAEA)

Room M

Planning Lecture | Technical division and Network Session |
Subcommittee on Particle Accelerator and Beams Science

**[TN14] Development of accelerator-application
technologies in the Tohoku area**

Chair: Jinfuen Yan (Osaka Univ.)

1:00 PM - 2:30 PM Room M (Lecture Rooms C C106)

**[TN1401] (1)Accelerator plan of the nuclear human
resource development, and research and
development center of the Aomori
Prefectural Government**

* Keizo Ishii¹ (1.Tohoku Univ.)

**[TN1402] (2)Current Status of Heavy Ion Radiotherapy
Project of Yamagata University Faculty of
Medicine**

* Takeo Iwai¹ (1.Yamagata Univ.)

**[TN1403] (3)Accelerator-experiment education using a
1-MV tandem Van de Graaff accelerator at
the Department of Quantum Science and
Energy Engineering, Tohoku University**

* Atsuki Terakawa¹ (1.Tohoku Univ.)

Room P

Planning Lecture | Board and Committee | Standards Committee 3

**[BC07] Basic principles to continuously adopt
measures for safety improvements at
nuclear power plants(the third session)**

Chair: Naoto Sekimura (Univ. of Tokyo)

1:00 PM - 2:30 PM Room P (Lecture Rooms C C200)

**[BC0701] (1)Ideal status for continuous safety
improvement**

* Seiichi Koshizuka¹ (1.Univ. of Tokyo)

**[BC0702] (2)Summary of the report on basic principles
to continuously adopt measures for safety
improvements at nuclear power plants**

* Tadahiko Kawai¹ (1.JANSI)

[BC0703] (3)General discussion

Naoto Sekimura¹, Seiichi Koshizuka¹, Takehiko
Nakamura², Yoshiyuki Narumiya³, Masahide Suzuki⁴

(1.Univ. of Tokyo, 2.JAEA, 3.KEPCO, 4.Nagaoka
Univ. of Technol.)

[TN12] Various Efforts toward Restarting Operation of Unit 1 and 2 of Sendai Nuclear Power Station, and Technical and Institutional Issues of the Regulation for 40-year Operation of Nuclear Power Plants

Chair: Yoichiro Shimazu (Fukui Univ.)

Mon. Mar 28, 2016 1:00 PM - 2:30 PM Room D (Lecture Rooms B B104)

[TN1201] (1)Various Efforts toward Restarting Operation of Unit 1 and 2 of Sendai Nuclear Power Station

*Kazutoshi Eto¹ (1.Kyushu Electric Power)

[TN1202] (2)Institutional Issues of the Regulation for 40-year Operation of Nuclear Power Plants

*Yoshihiro Nishiwaki¹ (1.IAE)

[TN1203] (3)Technical Issues of the Regulation for 40-year Operation of Nuclear Power Plants

*Tadashi Narabayashi¹ (1.Hokkaido Univ.)

原子力発電部会セッション

「原子力発電所の再稼働までの取り組み、並びに、40 年運転規制の技術的及び制度的課題について」

(1) 川内原子力発電所 1, 2 号機の再稼働までの取り組みについて

(1) Various Efforts toward Restarting Operation of Unit 1 and 2 of Sendai Nuclear Power Station

江藤 和敏¹

¹九州電力(株)

1. はじめに

福島第一原子力発電所の事故を踏まえ、平成 25 年 7 月に核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律(以下、原子炉等規制法)の改正等により強化された原子力発電所の新規制基準が施行されたことから、当社は、原子力規制委員会(Nuclear Regulation Authority; NRA)に対し、川内原子力発電所 1, 2 号機及び玄海原子力発電所 3, 4 号機に関して、新規制基準への適合性確認のための「原子炉設置変更許可(基本設計)」、「工事計画認可(詳細設計)」、「保安規定変更認可(運用管理)」を一括して申請した。

数 10 回の審査会合、数 100 回のヒアリングを重ねた後、平成 26 年 9 月 10 日、NRA は、川内原子力発電所 1, 2 号機について、原子炉設置変更を許可した。

その後、工事計画認可、保安規定変更認可、使用前検査等の手続きを踏んで行き、川内 1 号機が平成 27 年 9 月 10 日、川内 2 号機が 11 月 17 日に通常運転に復帰した。

本講演では、川内原子力発電所が再稼働を果たすまでの取り組みについて概説する。

2. 新規制基準への適合

新規制基準においては、地震や津波などの共通の要因によって、原子力発電所の安全機能が一斉に失われることを防止するために、耐震・耐津波性能や自然現象の想定、電源の信頼性、冷却設備の性能などの設計基準が強化された。

また、設計基準の想定を超えるような、万一の重大事故が発生した場合に備え、可搬型設備などを活用した重大事故に備えた対策が新たに追加された。

2.1 重大事故を防止するために強化・新設した主な対策

(1) 地 震

- ・ 発電所は、活断層がない地盤に設置していることを確認した。
- ・ 基準地震動(発電所の建屋や機器の耐震安全性評価に用いる基準となる地震動)として、発電所周辺の活断層から想定される地震動(①)と、震源と活断層の関連付けが難しい過去の地震に基づく地震動(②)を設定した。
 - ① 発電所周辺の活断層による地震を厳しく評価し、540 ガルに設定
 - ② 国が示した過去に国内で発生した 16 地震のうち、北海道留萌支庁南部地震(2004 年)を考慮して、620 ガルを追加

(2) 津 波

- ・ 琉球海溝のプレート間地震(Mw9.1)による津波の高さを海拔 5m 程度(取水口付近)と評価し、地震による地盤沈下や満潮位の変動なども考慮の上、発電所への最大遡上高さを海拔 6m 程度と想定し、対策を行った。
- ・ 発電所の主要設備がある敷地は海拔約 13m であり、津波に対し十分な余裕があることを確認した。
- ・ 海水ポンプエリア(海拔約 5m)の周辺に、防護壁(海拔約 15mm)を設置するとともに、津波の引き波時にも原子炉等の冷却に必要な海水を確保するための貯留堰を取水口前面に設置した。
- ・ 更に、津波や漂流物に対する安全性を向上させるため、防護堤(海拔約 8m)を設置した。

(3) 火 山

- ・ 発電所から半径 160km 圏内にある 39 火山を調査し、将来活動する可能性のある 14 火山の影響について評価した。
- ・ 発電所運用期間中に、発電所への影響が最も大きい火山事象として、約 1.3 万年前に発生した桜島薩摩噴火規模の厚さ 15cm の火山灰を想定した対策を実施した。

Kazutoshi ETO¹

¹Kyushu Electric Power Co., Inc.

- ・ カルデラの破局的噴火(噴出物量 100km³以上)が発電所運用期間中に発生する可能性は、十分小さいと評価^{※)}し、今後も可能性が十分小さいことを継続的に確認するため、火山活動をモニタリングする。

※) 桜島のある鹿児島地溝におけるカルデラの破局的噴火の活動間隔は約 9 万年であり、直近の破局的噴火は約 3 万年前である等

(4) 竜巻

- ・ 日本で発生した過去最大の竜巻を考慮して、最大風速 100m/s の竜巻を想定した対策を実施した。
重要な屋外設備には飛来物の衝突を防止する防護ネットを設置
資材保管用コンテナは固縛等により飛散を防止

(5) 火災

- ・ 火災を早期に感知・消火するため、安全上重要なポンプ等の設置エリアにおいて、検知方法の異なる火災感知器や自動消火設備を増設するなど、発電所構内の火災対策を強化した。

(6) 内部溢水

- ・ 配管やタンクの破損によって、安全上重要な設備が使用できなくなることがないように、配管からの蒸気漏れを早期に検知して自動で止める設備や、浸水を防止する水密扉の設置など、内部溢水に対する防護対策を行った。

2.2 重大事故の発生に備え新設した主な対策

(1) 電源の多様化

- ・ 非常用ディーゼル発電機の燃料油貯蔵タンクの増設など、常設の電源設備を強化するとともに、外部電源及び常設の非常用電源が喪失した場合に備え、大容量空冷式発電機などを新たに設置するなど、電気を供給する手段を多様化した。

(2) 炉心損傷防止対策

- ・ 常設のポンプに加えて、可搬型のポンプ等を追加配備し、原子炉等の冷却手段を多様化した。
可搬型注入ポンプ(新設)による原子炉・蒸気発生器への注水
常設電動注入ポンプ(新設)による原子炉への注水
格納容器スプレイポンプ(機能追加)による原子炉への注水
移動式大容量ポンプ車(新設)による海水供給

(3) 格納容器破損防止対策

- ・ 格納容器スプレイポンプによる格納容器の冷却ができない場合に備え、冷却手段を多様化した。
常設電動注入ポンプ(新設)による格納容器スプレイ
可搬型注入ポンプ(新設)による格納容器スプレイ
移動式大容量ポンプ車(新設)による格納容器再循環ユニットへの海水供給
- ・ 水素爆発を防止するために、事故時に格納容器内に水素が発生した場合でも、水素の濃度を低減する対策を行った。
静的触媒式水素再結合装置(新設)
電気式水素燃焼装置(新設)

(4) 放射性物質の拡散抑制

- ・ 万が一、格納容器が破損したとしても、発電所外への放射性物質の拡散を抑制するため、破損箇所へ放水する放水砲を配備するとともに、放水時に放射性物質を含んだ水が海洋へ拡散することを抑制するため、シルトフェンス(海中カーテン)を配備した。

(5) 指揮所等の支援機能の確保

- ・ 発電所構内の高台に、重大事故が発生した場合の現地対策本部として、耐震性を有し、通信設備等を備えた緊急時対策所を設置しました。

(6) 重大事故時等の対策の有効性

- ・ 新たに設置した設備や対策により、最も厳しい重大事故(炉心溶融が早く、格納容器内の圧力が高く推移するケース^{※)})が発生した場合でも格納容器は破損せず、放射性物質(¹³⁷Cs)の放出量は 7 日間で

5.6TBq になることを評価し、原子力規制委員会によって確認された。

- ・ この放出量は、新規規制基準の制限値 100TBq の約 18 分の 1(福島第一事故の約 1,800 分の 1)の水準である。

※) 全交流電源喪失とともに、原子炉冷却水が配管破断により大量に漏れ出る事故

3. 設置変更許可から再稼働を果たすまで

原子炉設置変更許可、工事計画認可、保安規定変更認可を一括申請したものの、設置変更許可申請書は、その後の審査会合での議論等を踏まえ、大幅な補正が加えられた後、許可された。

これに伴い、工事計画認可申請書、保安規定変更認可申請書にも、補正を加え、平成 27 年 3 月 18 日に 1 号機の工事計画が、5 月 22 日に 2 号機の工事計画が、5 月 27 日に保安規定変更が認可された。

その後、使用前検査に加え、施設定期検査、安全管理検査、溶接安全管理検査、保安検査を受検し、通常運転に復帰した。

また、世界原子力発電事業者協会(World Association of Nuclear Operators; WANO)及び原子力安全推進協会(Japan Nuclear Safety Institute; JANSI)の再稼働に関する支援を受けた。

3.1 工事計画認可

従前は、電気事業法に基づく規制だったが、新規規制基準では原子炉等規制法の要求へと変更された。この際、従前から要求されている強度計算、耐震計算に加え、火災防護、溢水防護、竜巻等の自然現象への配慮に関する説明書等も必要となり計算書の種類が大幅に増えたこと、可搬設備や通信設備等、評価対象設備が増えたことにより、工事計画認可申請書の最終版は、1 号機が約 30,000 ページ、2 号機が約 29,000 ページとなり、建設工事のものに匹敵する膨大な量となった。

また、特に、認可実績のない評価手法に考慮すべき不確実さの扱い等に関し、原子力規制庁との合意に非常に多くの時間を要したことから、設置変更許可から工事計画認可までに半年以上を要することになった。

3.2 保安規定変更認可

内部溢水、地震、津波、竜巻及び火山(降灰)等の発生時の体制整備、火山活動のモニタリング等の体制、重大事故、大規模損壊発生時の体制整備等について追加記載し、認可を得た。

重大事故、大規模損壊発生時の体制として、52 名/班の宿直を編成し、夜間・休日でも速やかに対応できるよう、発電所内又は近傍に待機させている。

3.3 使用前検査

従前は、電気事業法に基づく規制だったが、新規規制基準では原子炉等規制法の要求へと変更された。

法令の内容は、電気事業法で規制されていた従前と変わらないが、バックフィット規制であることから、新設設備のみならず、既設設備も使用前検査の対象となったこと、品質管理検査、基本設計方針検査の従前にはなかった NRA の内規に基づく検査が加わったことから、検査対応に非常に多くの時間と労力を費やす必要が生じ、玄海や本店から 100 名規模の検査応援者を川内に派遣したものの、工事計画認可から使用前検査合格までに約半年を要した。

3.4 その他の検査

使用前検査に加え、以下の NRA による検査・審査にも同時並行で対応した。

- 施設定期検査:いわゆる定期検査
- 定期安全管理審査:定期検査期間中に実施する事業者検査の体制に関する審査
- 溶接安全管理審査:溶接を行った際に実施する事業者検査の体制に関する審査
- 保安検査:保安規定の遵守状況に関する検査

原子炉起動前、プレスに公開された重大事故を想定した訓練は、安全上重要な行為に対する保安検査に新たに加えられた項目として実施されたもので、事故シナリオに対し定められた操作を定められた時間内に完了できるかが検査された。

3.5 長期停止を考慮した対応

4 年以上の長期停止を考慮し、再稼働の際には、以下の対策等を講じた。

- 発電所と本店の情報共有を強化した。
 - 毎朝、発電所、本店、東京支社でミーティングを実施した。
 - 出力上昇前には、CNO(Chief Nuclear Officer)も参加する検討会を発電所と本店とで実施した。
- 運転プラントの経験がない若手社員が増えていることから、以下の対策を講じた。
 - 川内の発電課長経験者を派遣し、ダブルチェックを行った。

- ベテラン運転員を川内に派遣し、若手のコーチを行った。
- タービンバランシング等により、起動工程が変更されることを考慮し、全ての運転当直班で、原子炉起動、発電機並列、出力上昇等のシミュレータ訓練を複数回実施した。
- 出力上昇に関する操作は、日勤の時間帯に計画した。

3.6 再起動時の運転経験

川内 1 号機では、電気出力 75%保持中に復水器細管からの海水混入が発生した。

この事象の概略は以下の通り。

- 電気出力 75%で調整運転を行っていた平成 27 年 8 月 20 日 14 時 19 分に、2 次系の復水ポンプ出口の電気伝導率高警報が発信した。
- 関連機器の調査を実施した結果、復水器#A ホットウェルの電気伝導率が上昇していることを確認するとともに、水質を分析した結果、微量な海水が混入したものと推定されたため、出力上昇を延期し、電気出力を 75%に保持した状態で、復水器#A 水室の点検を実施することとした。
- 調査結果により海水混入の原因として特定された細管 5 本、及び予防保全としてその周辺の細管を含む合計 69 本について施栓を実施した。

川内 2 号機は、順調に通常運転に復帰した。

なお、1 号機の運転経験を反映し、起動前に 2 号機の復水器#A 水室管群外周部の細管 1,358 本について渦流探傷検査(Eddy Current Test; ECT)を行った。ECT の結果、貫通した細管は無かったが、1 号機と同様のエリアにある細管 57 本について、予防保全として施栓を実施した。

3.7 WANO、JANSI による再稼働支援

川内再稼働の動向は世界からも注目されており、WANO による再稼働レビュー、JANSI によるエキスパートワークダウン(Expert Walkdown)等の再稼働支援を受けた。

また、川内再稼働に係る当社が発信した情報は、JANSI、WANO を介して、世界中の原子力事業者に発信された。

4. 最後に

川内原子力発電所は、新規制基準に適合し、再稼働を果たしたが、今後も、原子力のリスクを経営の最重要課題と位置づけ、規制の枠組みに留まることなく、原子力の自主的な安全性向上の取組みを継続・改善していくことが何より重要と考えている。経営トップの強いリーダーシップのもと、「常に世界最高水準の安全性」を目指して行く。

以 上

原子力発電部会セッション

「原子力発電所の再稼働までの取り組み、並びに、40 年運転規制の技術的及び制度的課題について」

(2) 40 年運転規制の制度的課題について**(2) Institutional Issues of the Regulation for 40-year Operation of Nuclear Power Plants**西脇 由弘¹¹エネルギー総合工学研究所**1. 40 年運転期間規制の導入の経緯**

原子力規制委員会設置法とともに、2012 年の通常国会において可決成立した改正原子炉等規制法の 40 年運転期間規制は、国会における激しい議論を踏まえて、複雑な経緯をとって成立した。

すなわち、当時の民主党政府が提出した 40 年運転規制は、衆議院での議論の結果、法案自身は一応そのままの形で成立させるが、原子力規制委員会発足後、制度そのものを、独立した委員会が専門的見地から見直すこととされた。

2. 安全審査における経年劣化の評価

段階規制の冒頭に位置する設置許可においては、40 年運転期間は、許可の条件ともされておらず、従って、設置許可上は、40 年という運転期間の制約はない。

3. 昨年指摘された 40 年運転規制の問題点

昨年の原子力規制委員会発足後の 3 年目の見直しの過程で、40 年運転規制について、下記の 2 点の問題点が指摘された。

- ① 原子炉等規制法第 43 条の 3 の 32 第 5 項は、「長期間の運転に伴う原子炉その他の設備の劣化の状況を踏まえた基準」を、下位法令に委任している。
同項の委任を受けた実用炉則第 114 条は、法の委任の範囲内である「原子炉その他の設備の運転に伴う劣化」に加え、「技術基準規則」(延長認可時点での新規制基準)にも適合することを求めており、法の委任範囲を逸脱した違法・脱法的な規則となっている。
- ② 運転延長の審査基準において、運転期間延長認可の時点で、バックフィットに関する工事計画認可の確定を求め、更に、その運用として、工認が確定していなければ、あるいは、延長認可の審査が終了していなければ、40 年の運転期間満了時点で不認可とすることとしていることは、下記の点で不合理である。
 - ・新規制基準は、運転再開までにバックフィットすればよいとしており、この委員会決定に反する
 - ・認可の時点は、法第 2 項の「満了」の解釈であり、法第 5 項を受けた延長認可の基準の中で規定されるべきものではない
 - ・技術的観点からも、原子炉の劣化は、徐々に進行し、運転期間の延長申請の審査中に、仮にこの 40 年の運転期間が満了したとしても、途端に危険になるという性質ものではなく、更に停止中の原子炉であれば劣化は進行せずリスクは増大しない

*Yoshihiro Nishiwaki¹

¹The Institute of Applied Energy

4. 残された制度的課題

40年運転期間規制制度は、2012年の原子炉等規制法案に突然盛り込まれたものであり、下記の諸点について、国際基準に適合せず、また、既存の原子炉等規制法の段階規制になじまない。

- ① 施設の経年劣化は、IAEA GS-G-1.2 2.19 では、一定間隔（インターバル）で評価することとなっており、この国際基準に合致していない。また、運転期間を40年としている米国のライセンス・リニューアルを参考に制度設計されたと言われているが、米国の制度は、技術的観点からではなく反トラスト法の観点から定められたものであり、また、米国では延長回数の制限は無い。
- ② 主要な経年劣化は運転することに依存しているが、40年という運転期間には、原子炉の停止中の期間も含まれており、特に昨今の原子炉の長期停止の状況を見ると、40年に停止期間を含めることには合理性がない。
- ③ 延長期間は最大20年であることから、当初の運転期間の40年に加えた60年以上は運転できないこととなっているが、この60年の根拠が示されておらず、憲法が保障する財産権を侵害しているのではないか。
- ④ 設置許可に運転期間の定めはなく、また、附款のような定めもなく、経年劣化に関しては、設置許可上は当初審査の余裕の範囲内であることを確認すればよいという確認行為であるにもかかわらず、なぜ運転の継続のために認可が必要なのか。
- ⑤ 何らかの理由で、運転延長の認可を得ていない原子炉（40年を越えたもの）や、延長認可期間を過ぎた原子炉（最長の場合60年を越えたもの）が、延長基準を満たしている、あるいは設備の変更などで延長基準を満たした場合、設置許可が生きているのに、なぜ運転をしてはいけないのか。
- ⑥ 延長認可が1回限りとされている根拠がなく、複数回の申請を許容する場合に比べ、非安全側の対応となっている。また、一度延長申請の認可を受けた原子炉が、その認可された延長期間を経過したのちであっても、延長基準を満たしている場合、なぜ再度の延長申請が不可能なのか。
- ⑦ 運転延長の基準は、バックフィットと高経年化評価の組み合わせとなっている。しかし、バックフィットは、常に行っていなければならない（満たしていなければならない）のであるから、運転延長の認可制度は高経年化評価と同一になる。
- ⑧ 40年運転期間規制制度は、40年時点での認可であり、その後は高経年化対策制度により保守管理などを確認しなければならず、自立できない制度であるという欠陥を有する。

40年運転期間制度と高経年化対策制度は、a.40年を超えて運転する場合に認可が必要、b.延長は1回に限る、c.延長期間は最大20年、という3点が異なるが、a.は上記④において、b.は上記⑥において、c.は③及び⑤において、その必要性が否定され、さらに、上記⑦及び⑧において高経年化評価制度が同等以上であることが示されたことから、40年運転期間制度は、高経年化対策制度に吸収され置き換えられるべきであり、原子力規制委員会は、法制定の経緯を踏まえ速やかに制度の再検討を行わなければならない。

以 上

原子力発電部会セッション

「原子力発電所の再稼働までの取り組み、並びに、40 年運転規制の技術的及び制度的課題について」

(3) 40 年運転規制の技術的課題について

(3) Technical Issues of the Regulation for 40-year Operation of Nuclear Power Plants

¹北海道大学 奈良林 直¹

1. はじめに

平成 24 年の「原子炉等規制法」の改正により、我が国の商業用原子力発電所の運転期間が 40 年に制限され、1 回に限り延長することが認められることとなった。規制委員会が発足してから 40 年問題について十分な議論が行われるべきとの見解が示されていたが、原子力規制委員会では未だ技術的な検討が行われていない。プラントの設計時に運転期間として 30 年ないし 40 年が設定されているが、これはあくまで設計時に構造物の健全性を評価するための指標であり、プラントの安全性と直接関係する年数ではない。運転年数の経過とともに材料や機能の低下が進む現象に対しては、設計時点で運転経過に伴う経年変化に余裕を加えて対処することとしており、日本機械学会の発電用設備規格・維持規格などの民間規格の導入により、劣化の進んだ配管などは、切断して新規の対策材と交換するなど、40 年運転時点での安全性は十分確保されている。特に我が国においては、発電プラントの高経年化に対する研究も長年にわたって実施してきており、その成果を踏まえて、高経年化プラントの技術評価制度が導入され、30 年経過時点から「高経年化技術評価」を行い、それ以降の 10 年間の運転を見込んだとしても十分に安全性が確保されることを確認して、運転を継続してきている。従って、運転期間を 40 年に制限し、1 回限りで最大 20 年の延長しか認めないという規定は、プラントの安全性の技術的評価に基づいた結果とはそぐわないものであり、欧米の規制との乖離ともなっている。本稿においては、40 年運転規制の技術的課題について述べる。

2. 海外における運転許可期間

アメリカにおいては、原子力法により運転認可期間は最長 40 年としているが、期間満了後は運転期間の更新（20 年間）が可能であり、既に 34 基（2014 年 12 月末）が 40 年を超えて運転を継続している。更に NRC は、再度の延長申請（80 年運転）についても検討を行っている。アメリカにおいては、原子力法により運転認可期間は最長 40 年としているが、代替電源の手当て等を考慮して、期間の更新申請は認可期限の 20 年前から可能となっている（10 CFR 54.17）。

欧州は、運転期間に関して明確な期限

を設けている国は少なく、10 年毎の定期安全レビュー（PSR）を行ってその後（10 年間）の運転継続の妥当性を評価している。

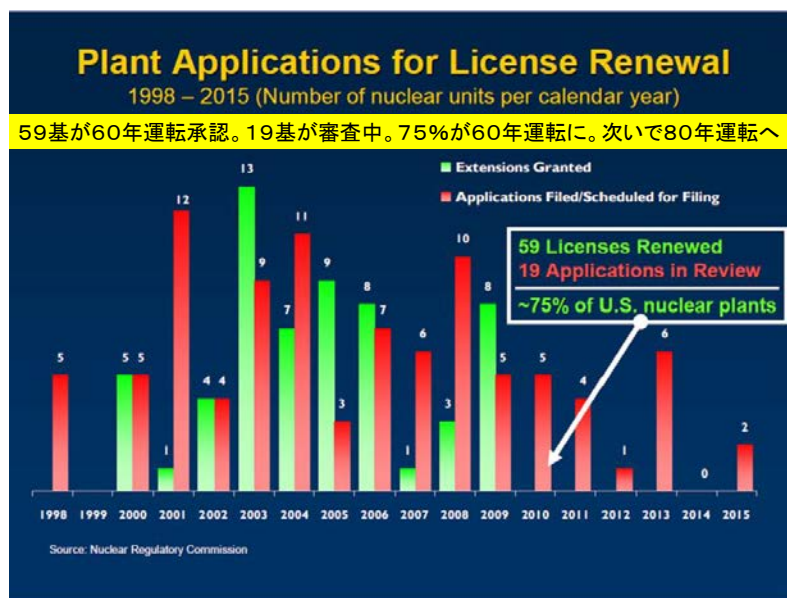


図1 米国104基のうち75%が60年運転へ

*Tadashi Narabayashi¹ ¹Hokkaido Univ.

3. 新規制基準施行後の我が国の40年超運転許可

「実用発電用原子炉の運転の期間の延長の審査基準」で「・・・延長認可の時点において、・・・工事の計画がすべて同条の規定に基づく認可等の手続きにより確定し・・・」と規定されているが、延長申請の審査が40年時点で終了していない場合の扱いが明記されていないため、以下の見解が出された。

40年運転期間延長問題に関する規制委員会の見解

＜平成26年度原子力規制委員会第32回会議（平成26年10月15日）より抜粋＞

田中委員長：ただ今の説明にありましたように、この40年運転延長制度には、経過措置などは法律に用意されていないということがあります。ということで、原子力発電所それぞれの炉については、運転開始から40年を迎える日までに延長認可を得ることができなければ、将来にわたって運転を延長することができないという制度になっております。

更田委員長代理：この制度は、運転開始40年を迎えた時点で、その時点における規制基準に適合していることが前提になっています。

これは見解であるので、将来より適切な形に修正することは可能であるが、現在40年運転期間延長手続きは、新規制基準に適合していることが、前提とされた。原子力規制委員会設置法附則第25条により、原子

炉等規制法改正法施行時点

（2013年7月）で運転期間が

37年を経過しているプラント

は、3年の猶予（運転期間は

2016年7月まで）が与えられた。

対象プラント：敦賀1号、

美浜1号、美浜2号、島根1号、

高浜1号、玄海1号、高浜2号

である。このうち、図2に■で

示す5基については新規制基準

への適合のための各種の対策

工事に必要な投資回収の経営

上の判断で、廃炉の決定がな

された（浜岡1、2号については

耐震補強工事等が必要なため、

2008年12月22日にリブレース計画から廃炉が決定済）。新規制基準に適合する上で、対策工事のコスト

が大きいものは、非難燃性ケーブルの難燃化対策工事である。高浜1号機、2号機（猶予期限：平成28年

7月）と美浜3号機（猶予期限：平成28年7月）については運転期間延長申請がなされた。関西電力は、

ケーブル難燃化対策工事の効果確認試験を実施し、ケーブルをバーナーで着火しても、ラッピング施工工

事により酸素欠乏による消火効果を確認して、難燃を技術的に解決した。このため、高浜1、2号につい

ては原子力規制委員会により型式化・重点化審査が行われ、2月24日付にて、適合審査書案が作成されて

パブコメが開始されたが、更に7月7日までに、40年超過運転のための特別点検を終了する必要がある。

4. まとめ

40年超運転審査は、現在迅速な審査が行われているが、今後は審査期間を十分に確保する観点から、

①十分な審査期間を確保する、②延長認可申請時期は、代替電源確保等を考慮して運転期間満了前の相当程度以前から可能とする、③延長期間の劣化対策に重点を移すなどが必要と考える。

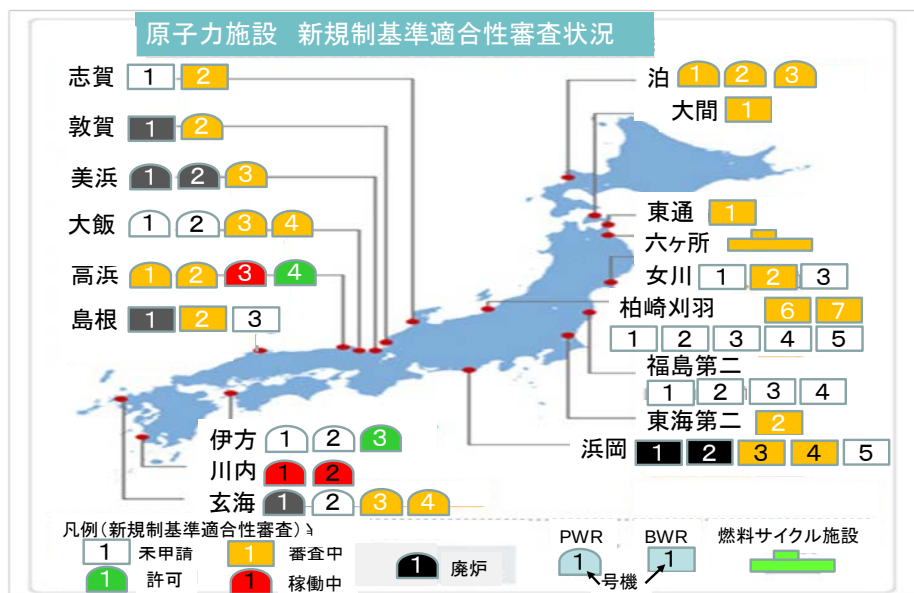


図2 新規制基準適合性審査状況と廃炉が決定した発電所

Planning Lecture | Over View Report | Over View Report 5

[OV05] Argument of criteria for scientifically preferable areas on HLW Geological Disposal

Chair: Yuichi Niibori (Tohoku Univ.)

Mon. Mar 28, 2016 1:00 PM - 2:00 PM Room I (Lecture Rooms B B200)

[OV0501] Interim report of criteria for scientifically preferable areas on HLW Geological Disposal

* Osamu Tochiyama¹, Akiomi Shimada², Akira Deguchi³ (1.NSRA, 2.METI, 3.NUMO)

総合講演・報告 5 「高レベル放射性廃棄物の最終処分に関する科学的有望地の要件・基準の議論
について」

科学的有望地の要件・基準に関する地層処分技術 WG における中間整理について

Interim report of criteria for scientifically preferable areas on HLW Geological Disposal

*朽山 修¹, 島田 顕臣²

¹原子力安全研究協会（地層処分技術 WG 委員長）, ²経済産業省資源エネルギー庁

1. 報告の趣旨

わが国における高レベル放射性廃棄物の地層処分については、1970 年代以降、関係研究機関等における研究開発が行われてきました。

それまでの研究成果を踏まえ、2000 年には地層処分の実現を目的とした「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」（最終処分法）が制定され、段階的な処分地選定プロセスが定められるとともに、処分地の選定を含む処分事業の実施主体として原子力発電環境整備機構 (NUMO) が設立されました。その後、NUMO は処分地選定調査の実施を希望する自治体の公募を全国で開始しましたが、現在に至るまで、調査を実施するに至っていない状況です。

このような状況を踏まえ、国は、処分地選定に向けた取組の改善に向けた検討を行い、2015 年 5 月に最終処分法に基づく基本方針を改定し、「科学的により適性が高いと考えられる地域を科学的有望地として示すなど、国が前面に立って取り組む」との新たな方針を示しました。

総合資源エネルギー調査会地層処分技術 WG では、この科学的有望地の具体的な要件・基準について主に地球科学的な観点から技術的（工学的）対応可能性を含めた議論を行い、2015 年 12 月 28 日にこれまでの議論の成果を中間整理として公表しました。

今回、この中間整理の内容をご報告します。

*Osamu Tochiyama¹, Akiomi Shimada²

¹Nuclear Safety Research Association, ²Ministry of Economy, Trade and Industry

Planning Lecture | Technical division and Network Session | Nuclear Data Division

[TN13] Transport of muons in matter and their interdisciplinary applications

Chair: Yukinobu Watanabe (Kyushu Univ.)

Mon. Mar 28, 2016 1:00 PM - 2:30 PM Room J (Lecture Rooms C C102)

[TN1301] (1)Applications of muons to atomic energy fields

* Teiichiro Matsuzaki¹ (1.RIKEN)

[TN1302] (2)Nondestructive elemental analysis with negative muons

* Kazuhiko Ninomiya¹ (1.Osaka Univ.)

[TN1303] (3)PHITS simulation for transport of muons

* Shin-ichiro Abe¹ (1.JAEA)

核データ部会セッション「ミューオンの物質内輸送とその学際的応用」

(1) 原子力分野へのミューオン応用：核変換と触媒核融合

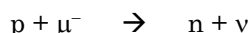
(1) Applications of muons to atomic energy fields: nuclear transmutation and fusion

松崎 禎市郎¹¹理化学研究所 仁科加速器研究センター

1. ミューオン核変換（ミューオン原子核捕獲反応）

負ミューオンは、質量が電子の 207 倍であり物質中では「重い電子」として振る舞う。負ミューオンは物質中の原子核のクーロン場に捕われてミューオン原子を形成し、 $n=14$ 程度のミューオン軌道から $1s$ 軌道までオーグメント電子やミューオン原子 X 線を放出してカスケードをする。 $1s$ 軌道にある負ミューオンは、自然崩壊と原子核捕獲の 2 つの競争過程をもっていて、その崩壊確率は、自然崩壊の平均寿命の逆数と原子核捕獲確率の和で記述できる。 $1s$ 軌道にある負ミューオンの寿命は、原子番号 $Z=6$ から $Z=40$ の範囲では Z^4 に反比例して減少し、より大きい Z の原子核では、80-100 nsec の値をとる。原子番号が $Z=40$ より大きい原子核では、ミューオン $1s$ 軌道半径が原子核半径より小さくなるので、大きい Z の原子核ではミューオン原子核捕獲確率は 100% に近い値となる。

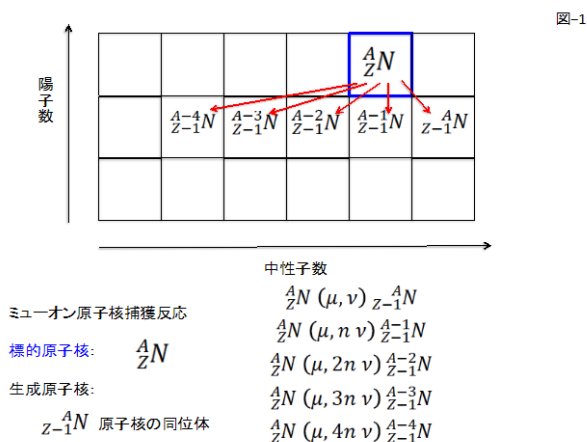
負ミューオン原子核捕獲が起ると、原子核内の素過程として、ミューオン (μ^-) が陽子 (p) と結びつき中性子 (n) とニュートリノ (ν) が形成される。



ミューオン静止質量エネルギー (106 MeV) の殆どはニュートリノが運動エネルギーとして持ち去り、原子核励起エネルギーとして 10-20 MeV 程度が残されると考えられている。陽子が中性子に変換するので、生成する原子核の質量数は不変だが、原子番号は 1 つ小さい ($Z-1$) 原子核の励起状態（複合核状態）が形成される。



図 1 に示すように、 Z 原子核のミューオン原子核捕獲反応では、 $Z-1$ 原子核の複合核励起状態から複数個の中性子放出が起こり、 $Z-1$ 原子核の同位体が生成する。ミューオン原子核捕獲反応は、原子番号 Z の原子核を原子番号 $Z-1$ の原子核同位体に核変換する反応である。

Teiichiro Matsuzaki¹¹RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science

Z-1 原子核の複合核励起状態からは、低い確率であるが、陽子や α 粒子の放出があることも知られているが、この場合でも、それぞれ Z-2 原子核や Z-3 原子核へ核変換することになる。このように、一個の負ミューオンは一個の原子核を必ず核変換するので、この手法を「ミューオン核変換」を呼ぶ事にする。

ミューオン原子核捕獲反応による核変換の具体例として、同位体濃縮した ^{108}Pd 標的のミューオン原子核捕獲反応を考えてみる。以下の原子核反応が、それぞれの反応に固有の反応確率（反応分岐比）をもって同時に進行する。

- $^{108}\text{Pd} (\mu^-, \nu) ^{108}\text{Rh}$ (半減期 16.8 秒で ^{108}Pd へ β^- 崩壊)
- $^{108}\text{Pd} (\mu^-, n \nu) ^{107}\text{Rh}$ (半減期 21.7 分で ^{107}Pd へ β^- 崩壊)
- $^{108}\text{Pd} (\mu^-, 2n \nu) ^{106}\text{Rh}$ (半減期 30 秒/2.2 時間で ^{106}Pd へ β^- 崩壊)
- $^{108}\text{Pd} (\mu^-, 3n \nu) ^{105}\text{Rh}$ (半減期 35.5 時間/45 秒で ^{105}Pd へ β^- 崩壊)
- $^{108}\text{Pd} (\mu^-, 4n \nu) ^{104}\text{Rh}$ (半減期 42 秒/4.4 分で ^{104}Pd へ β^- 崩壊)
- $^{108}\text{Pd} (\mu^-, 5n \nu) ^{103}\text{Rh}$ (安定核)

過去の実験論文を調べると、中性子 5 個を放出する反応も観測されているので、ここでは $(\mu^-, 5n \nu)$ 反応までを記述してみた。中性子を 1 個放出できるエネルギー（中性子分離エネルギー）が 6-8 MeV 程度であるにもかかわらず、10-20 MeV の複合核励起状態から 5 個もの中性子が放出される確率があることは大変興味深い。同位体濃縮 ^{108}Pd を標的とするミューオン原子核捕獲反応の生成核種は Rh の放射性同位体核種であり、大部分は β^- 崩壊して安定核の Pd の同位体となる（ ^{107}Rh の場合を除く）。ここでの $(\mu^-, 5n \nu)$ 反応の生成核は ^{103}Rh （安定核）となる。

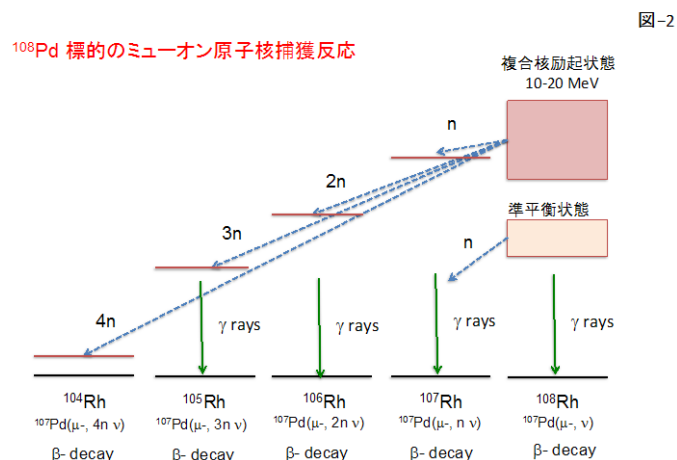


図 2 は、 ^{108}Pd 標的の 4n 反応までを想定したミューオン原子核捕獲反応過程のイメージ図である。負ミューオンを原子核捕獲した ^{108}Pd は ^{108}Rh の複合核励起状態を形成し、さらに複数個の中性子を放出し、Rh の放射性同位体の励起準位を作り、それらの励起準位からは γ 線崩壊により Rh 同位体の基底準位が生成される。Rh 同位体の生成確率は反応分岐比に支配されるので、この反応分岐比を精密に決定することは重要である。また、放出中性子個数分布や中性子エネルギー分布を実験で求めると、中性子の放出機構を複合核蒸発模型や原子核内部カスケード模型を用いた理論との比較ができる。ミューオン原子核捕獲反応機構を実験的に解明し、その反応機構の理論の構築を目指し、さらに、ミューオン核変換を応用する研究を進めたいと考えている。

2. ミューオン触媒核融合

水素に負ミューオンを入れるとミューオン水素原子が形成され、その大きさは水素原子の $1/207$ とある。この特徴を生かした典型例がミューオン触媒核融合 (μCF) である。

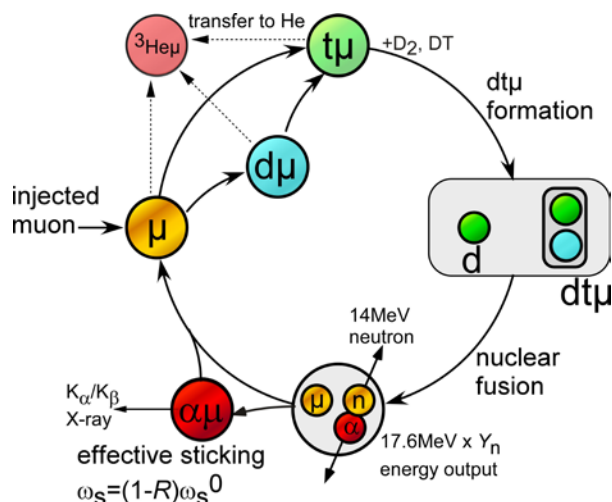
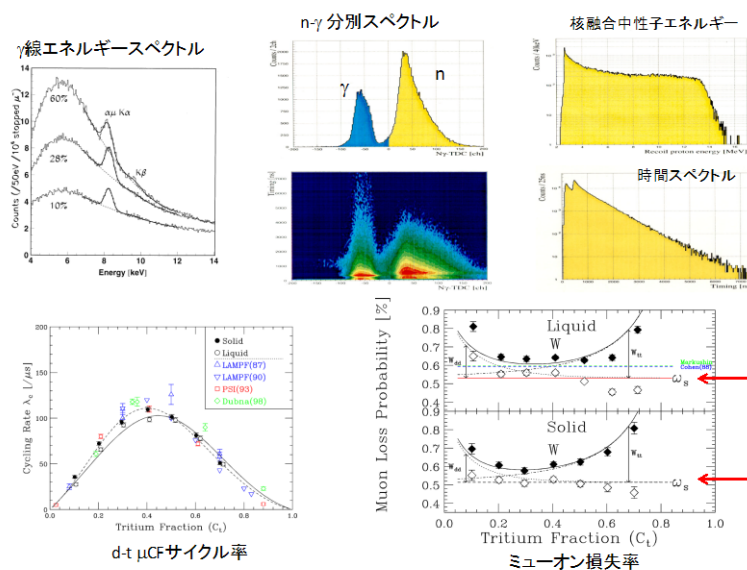


図3に示すように、負ミューオン (μ^-) が二重水素 (D) と三重水素 (T) の混合系に静止すると、主に $t\mu$ 原子が形成される。電気的中性の $t\mu$ 原子は、クーロン力を感じないで D_2 分子と衝突し、3体の束縛状態である $dt\mu$ 分子を共鳴的に生成する。この $dt\mu$ 分子の大きさは小さいので、自発的に分子内で $d+t \rightarrow \alpha+n$ 核融合反応が起こる。反応後、大部分の μ^- は解放され、次の核融合サイクルを引き起こす。一方、核融合生成された α 粒子にミューオンが付着して $\alpha\mu$ 原子となる確率があり、さらに $\alpha\mu$ 原子の減速過程で付着しているミューオンがはぎ取られて核融合サイクルにもどる確率もある。この μCF 現象は、入射 μ^- ビームを制御することにより d-t 核融合反応を制御することができ、低炭素社会に向けた有望なクリーンエネルギー源となりうる可能性を秘めている。

理化学研究所では英国に設置した理研 RAL ミューオン施設において、大強度ミューオンビームと、先端的トリチウム取り扱いシステムを生かして、主に $\text{D}_2\text{-T}_2$ 標的中で起きるミューオン触媒 d-t 核融合研究を推進してきた。実験では、d-t 核融合に伴う中性子、ミューオン原子 X 線、 $\mu\text{-e}$ 崩壊電子を計測した。



その実験結果のまとめを図4に示す。上段の左から(1)ミューオンが α 粒子に付着して発生する8.2 keV のミューオン原子X線スペクトル、(2)NE213 液体シンチレーションカウンタによる中性子-ガンマ線の分離スペクトル、(3)右の上段は核融合中性子エネルギースペクトルであり14.4 MeV のd-t 核融合中性子が確認できる。右の下段は中性子の時間スペクトルである。そして、下段左側は(4) D_2-T_2 比を変化させた核融合サイクル率の測定結果であり、右側は(5) D_2-T_2 液体標的または固体標的で D_2-T_2 比を変化させたミューオン損失率の測定結果である。実験中のミューオン強度や標的量にもよるが、通常では毎秒約100万回程度のd-t 核融合を計測している。

核融合サイクル率は、温度・密度・ D_2-T_2 混合比に依存し、固相・液相・気相などの状態によっても変化するが、観測された最大核融合サイクル数はミューオン1個あたり約120回である。核融合1個あたりの放出エネルギーは17.6MeV であるので、これは2.1GeV のエネルギー出力に相当する。一方、1個のミューオン生成に必要な加速器ビームエネルギーは約5GeV とされている。現状では、出力エネルギーは入力エネルギーの約40% 程度となっている。次の目標は、エネルギー出力値が必要値を超えること(ブレイクイーブン)を目指すことである。核融合サイクル率は、(1) $dt\mu$ 分子の生成率(生成速度)、(2)核融合後 μ^- が α に付着して失われる $\alpha\mu$ 損失率、(3) $\alpha\mu$ イオンがその減速過程で物質との相互作用により付着していた μ^- が乖離して次の μCF サイクルに参加する確率、(4) D_2-T_2 標的の密度、等に起因している。もし何らかの方法で α 粒子に付着しているミューオンを全て解離させる事が出来れば、現在実験で得られている $dt\mu$ 分子生成率値で見積ることができる核融合サイクル数は D_2-T_2 液体で290回、固体で340回になり、ブレイクイーブンを達成できることになる。技術的には極めて難しいが、 D_2-T_2 標的密度を液体水素密度の5倍程度まで増やすことができれば、核融合回数は1200回まで増加することが見積もられる。また、 D_2-T_2 ガスの分子状態の(レーザーによる)制御、 D_2-T_2 標的に外的条件(電場、磁場、高周波共鳴、衝撃波、等)を加えることで核融合サイクル数を増やすアイデアもある。いままで系統的に液体と固体の D_2-T_2 標的の μCF 実験を行ってきたが、 μCF サイクル数を上げるためには、高温・高圧(1000K・1000気圧程度)状態の D_2-T_2 標的が適しているという指摘もある。高温・高圧状態の D_2-T_2 標的では D_2-T_2 ガスが金属容器壁を容易に透過してしまうため、 μCF 実験を安全に実施するためには入念な実験装置の設計製作が必要である。

核データ部会セッション「ミューオンの物質内輸送とその学際的应用」

(2) 負ミューオンを用いた非破壊元素分析

(2) Nondestructive elemental analysis with negative muons

二宮 和彦¹¹ 大阪大学大学院理学研究科

1. 負ミューオンを用いた非破壊元素分析の原理

負ミューオン（ミュオンともいう）は、電子と同じ電荷を持ち、電子の 200 倍の質量を持つ素粒子である。負ミューオンが物質中に停止すると、負ミューオンは電子と同じように原子核の周りに軌道を作り、ミュオン原子と呼ばれる原子系を形成する。負ミューオンは電子の 200 倍の質量を持っていることから、ミュオン原子は電子の特性 X 線の 200 倍のエネルギーを持ったミュオン特性 X 線を放出する。

本講演では、ミュオン特性 X 線を用いた新しいタイプの元素分析法について紹介する。よく知られている蛍光 X 線分析では、X 線のエネルギーが低いために試料の深部の分析が難しく、また軽元素に対する定量性が低いという制限がある。それに対しミュオン特性 X 線は、軽元素由来であっても高エネルギーの X 線であり、ミリメートルを超える物質の深部から放出されたものも検出可能である。さらに負ミューオンは大型の加速器施設で生成する必要があるが、負ミューオンの利用施設では一般的に電磁石によりエネルギーの選別を行っており、負ミューオンの物質への入射エネルギーを選択することで、負ミューオンの停止深さを制御することができる。これらの特性により、ミュオン特性 X 線による元素分析では、非破壊で位置選択的な、さらに軽元素を含めた定量的な分析が可能である。

2. 負ミューオンを用いた元素分析の例：考古学試料の分析

ミュオン特性 X 線による素分析のデモンストレーションとして、我々は江戸時代に製造された天保小判に対する分析を行った[1]。江戸時代の小判は、表面近傍に質量パーセントで 90% を超えるような金の含有量の多い層が存在し、それにより見事な金光沢を作っているが、実際に内部の金の含有量は天保小判では 57% 程度であり、残りは銀でできた合金である。

我々は茨城県東海村の J-PARC 内にある、ミュオン実験施設（MLF/MUSE）において負ミューオン照射実験を行った。負ミューオンの入射エネルギーを変化させながら、ミュオン特性 X 線の強度をゲルマニウム半導体検出器により測定し、金と銀の標準合金をから得た検量線をもとに、図 1 に示すように天保小判の 2~300 μm の深さ範囲での金の含有率を非破壊で決定した。この結果は他の破壊分析により決定した金の含有率とも一致した。

講演では本手法の原理や実験の詳細について、また考古学試料以外への応用例についても紹介する。

[1] K. Ninomiya *et.al.*, *Anal. Chem.*, **87** (2015) 4597

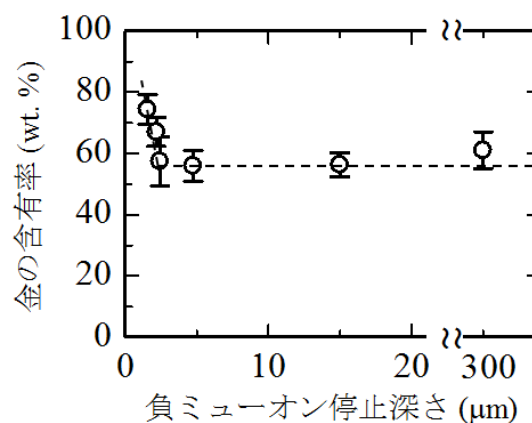


図 1：ミュオン特性 X 線測定により決定した天保小判の金の含有量の深さ依存

Kazuhiko Ninomiya¹

¹ Graduate School of Sci. Osaka Univ.

核データ部会セッション「ミューオンの物質内輸送とその学際的应用」

(3) ミューオン輸送の PHITS シミュレーション

(3) PHITS simulation for transport of muons

*安部 晋一郎¹、佐藤 達彦¹¹ 日本原子力研究開発機構

1. 背景

近年、様々なミューオン応用研究が進められている。例えば、宇宙線ミューオンを用いた原子炉やコンテナ中の核物質の検出、火山やピラミッドなどの巨大構造物の透過、宇宙線ミューオンによる生成放射性核種を用いた地質年代測定、負ミューオンを用いた核変換や触媒核反応、非破壊元素分析などがある。

原子力機構（JAEA）、高度情報科学技術機構（RIST）、高エネルギー加速器研究機構（KEK）が中心となって開発を進めている粒子輸送計算コード PHITS[1]は、任意の体系中の放射線の核反応と輸送を計算する汎用モンテカルロコードである。最近、ミューオンと物質との相互作用（制動放射、電子・陽電子対生成、ミューオン光核反応、負ミューオン捕獲反応）の計算モデルを現在開発中の PHITS に導入した[2]。本発表では、計算モデルのベンチマーク結果とともに、負ミューオン捕獲反応による長寿命放射性核種の核変換および宇宙線ミューオン起因ソフトウェアに関する PHITS シミュレーション結果を報告する。

2. ミューオン輸送に関する測定実験の PHITS 解析

制動放射、電子・陽電子対生成、ミューオン光核反応に起因するミューオンの阻止能のベンチマークとして、地中での宇宙線ミューオンの輸送計算を行った。100GeV から 20TeV までの宇宙線ミューオンを地面へ垂直に入射させた条件について、深さ方向のミューオン透過フラックスを計算した。その結果、図 1 に示すように PHITS は測定値[3, 4]を非常に良く再現した。

高エネルギーミューオンの相互作用による粒子生成の評価として、CERN で実施された NA54 実験[5]および NA55 実験[6]について計算を行った。NA54 実験では、厚さ 3m 程度のコンクリート壁の後方に標的を配置し、100GeV/c および 190GeV/c のミューオンをコンクリート壁前面から照射し、標的内で得られた放射性核種の生成断面積が測定された。地質年代測定で利用される放射性核種の生成反応である $O(\mu, x)^{10}\text{Be}$ 、 $O(\mu, x)^{14}\text{C}$ 、 $Si(\mu, x)^{26}\text{Al}$ および $Ca(\mu, x)^{36}\text{Cl}$ の生成断面積の測定値と計算結果を図 2 に示す。 ^{14}C 以外の生成核種に関しては実験値を非常に良く再現しており、 ^{14}C に関しても誤差の範囲内での一致が得られることが実証された。NA55 実験では、炭素標的（直径 8cm、厚さ 75cm）、銅標的（直径 10cm、厚さ 25cm）、鉛標的（直径 20cm、厚さ 10cm）に 100GeV/c および 190GeV/c のミューオンを照射し、ミューオン照射方向に対して 45 度、90 度、135 度方向に放出される 10MeV 以上の中性子が測定された。図 3 に各標的に関する角度微分断面積の実験値と計算結果を示す。鉛標的からの中性子放出は全放出角度で過小評価する一方、炭素、銅標的に関しては実験値との良い一致が得られた。また、図 4 に炭素標的に関する二重微分断面積の実験値と計算結果を示す。放出中性子のエネルギー分布の計算結果について、135 度方向への放出では実験値の傾向と差異が見られるが、45 度および 90 度方向への放出に関しては実験値との良好な一致を示した。

Shin-ichiro Abe¹, Tatsuhiko Sato¹¹Japan Atomic Energy Agency

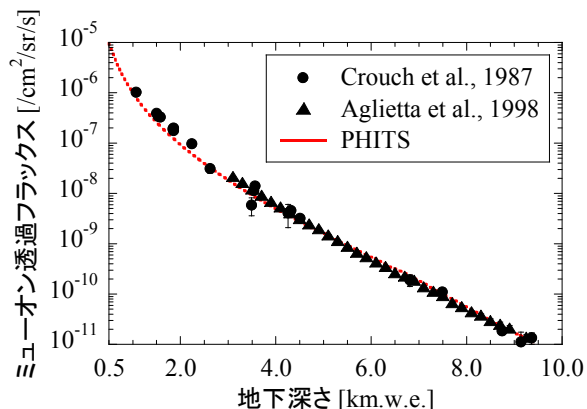


図1. 地中での環境ミュオン透過フラックス [3, 4]

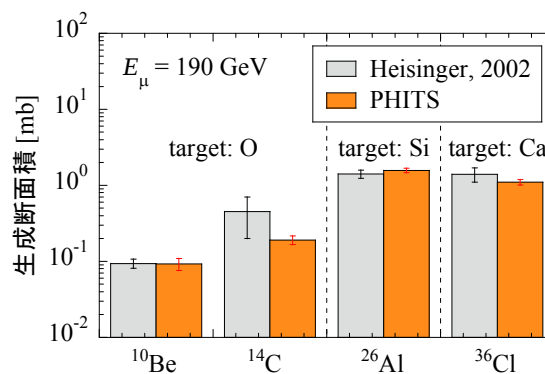


図2. 190GeV/c ミュオン照射により得られる放射性核種の生成断面積 [5]

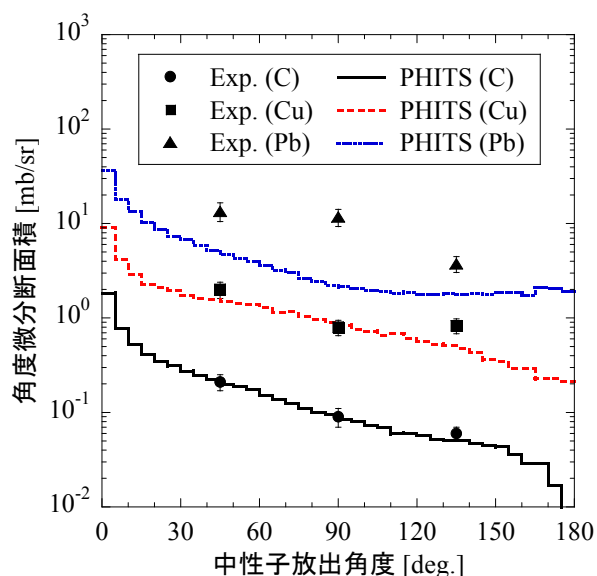


図3. 190GeV/c ミュオン照射により得られる中性子の角度微断面積 [6]

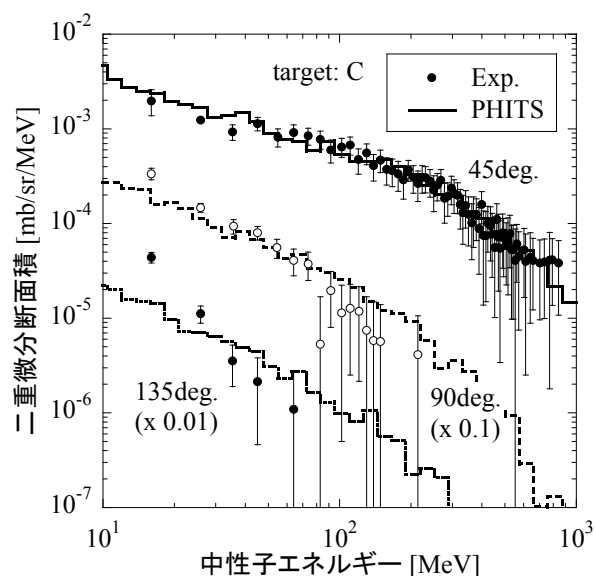


図4. 190GeV/c ミュオン照射により得られる中性子の二重微断面積 [6]

負ミュオン捕獲反応からの粒子生成について評価するため、標的内で停止する程度のエネルギーの負ミュオン照射による中性子生成に関して計算を行った。図5にシリコン標的から生成される中性子の放出エネルギー分布の実験値[7, 8]と計算結果を示す。高エネルギー中性子放出に関して実験値の過小評価が見られるが、その他は概ね実験値と一致する結果となった。図6に1回の反応から放出される中性子数を意味する中性子多重度の実験値[9]と計算結果を示す。中性子多重度に関しても実験値と30%以内の一致が得られた。

3. 負ミュオン捕獲反応による核変換の解析

原子力利用において放射性廃棄物の処理・処分の負担軽減が課題となっており、高レベル放射性廃棄物の分離・核変換技術の研究が進められている[10]。マイナーアクチノイドを核変換した結果、放射性廃棄物の長期保管の主因は残された長寿命核分裂生成物(LLFP)となる。よってLLFPの核変換を行うことで更なる負担軽減が期待され、中性子、光子、負ミュオンを用いた核変換の反応経路の研究が行われている[11, 12]。

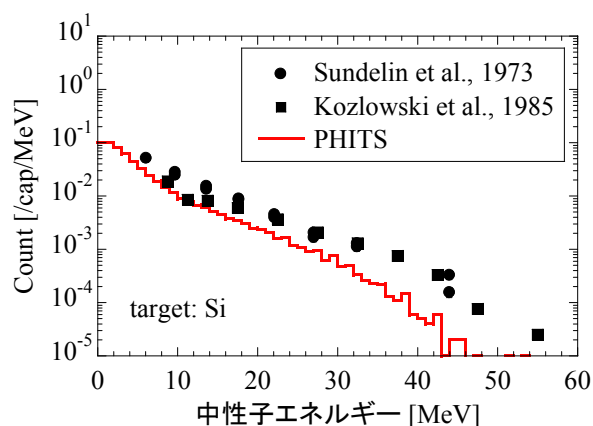


図 5. 負ミューオン捕獲反応により Si 標的から得られる中性子の放出エネルギー分布 [7, 8]

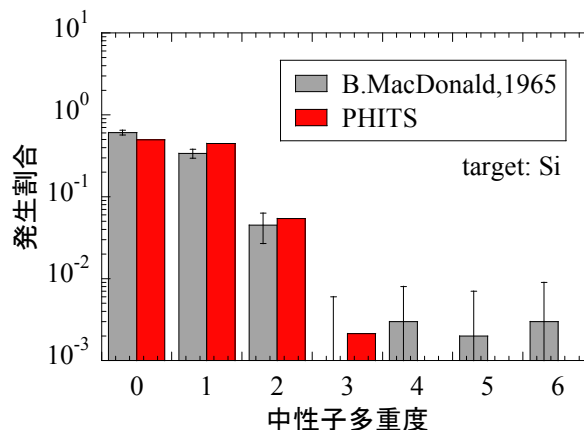


図 6. 負ミューオン捕獲反応により Si 標的から得られる中性子多重度 [9]

表 1. ^{79}Se 標的に関する放射性核種生成割合

生成割合 [1/muon]	0.076	0.265	0.304	0.201
	^{76}As	^{77}As	^{78}As	^{79}As
	(1.09d)	(1.62d)	(1.51h)	(9.01m)
崩壊系列 (半減期)	▼	▼	▼	▼
	^{76}Se	^{77}Se	^{78}Se	^{79}Se
	(stable)	(stable)	(stable)	(3e+5y)

表 2. ^{135}Cs 標的に関する放射性核種生成割合

生成割合 [1/muon]	0.129	0.224	0.393	0.125
	^{132}Xe	^{133}Xe	^{134}Xe	^{135}Xe
	(stable)	(5.25d)	(stable)	(9.14h)
崩壊系列 (半減期)		▼		▼
		^{133}Cs		^{135}Cs
		(stable)		(2.3e+6y)

本研究では負ミューオン捕獲反応による核変換に着目し、LLPF である ^{79}Se および ^{135}Cs 標的への負ミューオン照射計算を行った。PHITS で計算した負ミューオン捕獲反応により得られる放射性核種の生成割合と、それぞれの核種の崩壊系列を表 1 および表 2 に示す。 ^{79}Se 標的に関しては 20%程度、 ^{135}Cs 標的に関しては 13%程度の生成核種がベータ崩壊を経て変換前の核種に戻る一方、80%程度は安定核種または短寿命核種に変換されることが分かった。

また、計算結果から得られた変換効率より、核変換に要する時間を次式で概算した。

$$t = N_A \times \frac{g}{M} \times \frac{\alpha}{\phi} \quad (1)$$

ここで、 N_A はアボガドロ数、 g は使用済核燃料に含まれる LLFP の質量、 M は LLFP の質量数、 α は変換効率、 ϕ は負ミューオン源の強度である。1 トンの使用済核燃料に含まれる ^{135}Cs は 500 g 程度であり[13]、負ミューオン源の強度として RCNP の MuSIC [14]で得られる最大値である $10^8 \mu/\text{sec}$ を想定した場合、核変換には 850 万年程度要することが分かった。この結果より、負ミューオンを用いた LLFP の核変換の実現には非常に高強度の負ミューオン源が必要となることが示された。[15]

4. 二次宇宙線ミューオン起因ソフトウェアの解析

放射線が半導体デバイスに入射した際に生じる電子機器の一時的な誤動作はソフトウェアと呼ばれ、地上環境下では主に二次宇宙線中性子がソフトウェアの主因となる。しかし、半導体デバイスの微細化に伴

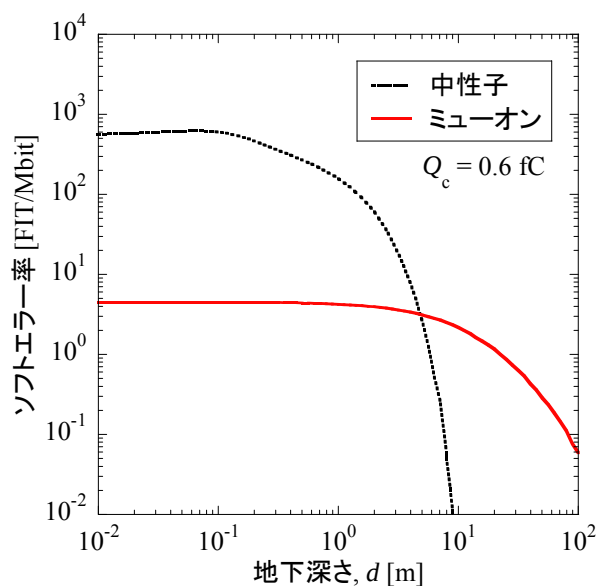


図 7. 宇宙線中性子および宇宙線ミューオン起因
ソフトウェア率の地下深さ依存性

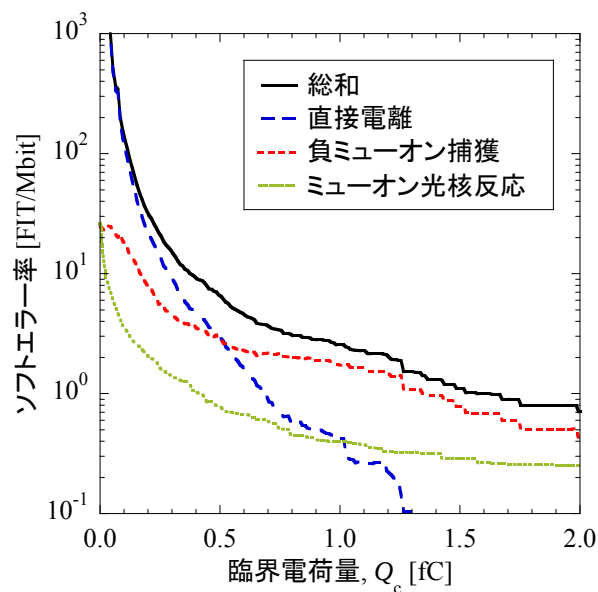


図 8. 宇宙線ミューオン起因ソフトウェア率への
各物理過程の寄与

い放射線耐性は低下しており、また中性子は建屋やサーバー筐体による遮蔽による効果を受ける一方でミューオンは透過性が高いため、近年は二次宇宙線ミューオンによる影響が懸念されている。

本研究では、設計ルール（半導体部品での基本的な配線の太さ）25nm の NMOSFET に関して、PHITS と多重有感領域モデル[16]を用いたソフトウェアシミュレーションを実施した。初めに、遮蔽物として地面を想定し、宇宙線起因ソフトウェア率の地下深さ方向に対する依存性を調査した。図 7 に宇宙線中性子起因ソフトウェア率と宇宙線ミューオン起因ソフトウェア率を示す。地表面付近では宇宙線中性子がソフトウェアの主因である一方、深さ 5m 付近では中性子遮蔽効果により宇宙線中性子起因ソフトウェア率は 1% 未満まで低下し、宇宙線ミューオンがソフトウェアの主因となることがわかった。この結果より、中性子が遮蔽された環境においては宇宙線ミューオンの影響を考慮する必要があることが示された。

宇宙線ミューオン起因ソフトウェア率に対する、各物理過程の寄与を調査した結果を図 8 に示す。入射ミューオンによる直接電離の影響は臨界電荷量の低い領域でのみ顕著であり、臨界電荷量が 0.6fC 以上の領域では負ミューオン捕獲反応が主因となる事が判明した。ミューオン起因ソフトウェアの測定実験は現在のところ正ミューオン照射のみ実施されているが、本解析結果は負ミューオン照射実験の必要性を示唆している。[17]

5. 結論

PHITS に導入したミューオン反応モデルのベンチマークを行った。その結果、地中での環境ミューオン透過フラックスに関しては測定値を非常に良く再現し、ミューオン反応からの生成粒子情報に関しても概ね良い一致が得られたが、鉛標的からの中性子生成に関しては実験値を過小評価することが分かった。

負ミューオン捕獲反応による長寿命放射性核種の核変換に関する PHITS 解析では、計算で得た変換効率を用いて核変換に要する時間を概算した結果、500 g の ^{137}Cs の変換に $10^8 \mu\text{sec}$ のミューオン源を用いた場合 850 万年要することが明らかとなった。

宇宙線ミューオン起因ソフトウェアの解析では、宇宙線中性子が遮蔽された環境においてはミューオンがソフトウェアの主因となることを示した。また負ミューオン捕獲反応がソフトウェアの主因であることが判明し、今後の負ミューオン照射によるソフトウェア測定実験の必要性が示唆された。

参考文献

- [1] T. Sato et al., *J. Nucl. Sci. Technol.*, vol. 50, p. 913 (2013).
- [2] S. Abe et al., Abstract PHITS Workshop, Sep 5, 2015, Ibaraki Japan, p. 5 (2015).
- [3] M. Crouch, *Proc. 20th Int. Cosmic Ray Conf., Aug 2-15, 1987, Moscow USSR*, vol. 6, p. 165 (1987).
- [4] M. Aglietta et al., *Phys. Rev. D*, vol. 58, p. 092005 (1998).
- [5] B. Heisinger et al., *Earth and Planetary Sci. Lett.*, vol. 200, p. 345 (2002).
- [6] V. Chazal et al., *Nucl. Instr. Meth. A*, vol. 490, p. 334 (2002).
- [7] R. M. Sundelin et al., *Phys. Rev. C*, vol. 7, p. 1037 (1973).
- [8] T. Kozlowski et al., *Nucl. Phys. A*, vol. 436, p. 717 (1985).
- [9] B. MacDonald et al., *Phys. Rev.*, vol. 139, p. B1253 (1965).
- [10] OECD/NEA, *NEA Report No. 6894* (2011).
- [11] W. S. Yang et al., *Nucl. Sci. Engineering*, vol. 146, p. 291 (2004).
- [12] K. Imasaki et al., *Energy Conversion and Management*, vol. 49, p. 1922 (2008).
- [13] R. Ando et al., *JAERI-Research 99-004* (1999).
- [14] Y. Hino et al., *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.*, vol. 253-255, p. 206 (2014).
- [15] S. Abe et al., *Proc. of CNR*15, Oct 19-23, Tokyo Japan*, P01 (2015).
- [16] S. Abe et al., *J. Nucl. Sci. Technol.*, vol. 53, p. 451 (2016).
- [17] S. Abe, et al., *Proc. of 11th RASEDA, Nov 11-13, Ibaraki Japan*, p. 45-48 (2015).

[TN14] Development of accelerator-application technologies in the Tohoku area

Chair: Jinfuen Yan (Osaka Univ.)

Mon. Mar 28, 2016 1:00 PM - 2:30 PM Room M (Lecture Rooms C C106)

[TN1401] (1) Accelerator plan of the nuclear human resource development, and research and development center of the Aomori Prefectural Government

*Keizo Ishii¹ (1.Tohoku Univ.)

[TN1402] (2) Current Status of Heavy Ion Radiotherapy Project of Yamagata University Faculty of Medicine

*Takeo Iwai¹ (1.Yamagata Univ.)

[TN1403] (3) Accelerator-experiment education using a 1-MV tandem Van de Graaff accelerator at the Department of Quantum Science and Energy Engineering, Tohoku University

*Atsuki Terakawa¹ (1.Tohoku Univ.)

加速器・ビーム科学部会セッション「東北地方における加速器応用技術の展開」

(1) 青森県原子力人材育成・研究開発拠点施設の加速器計画について

(1) An accelerator plan in R&D and training site for nuclear fields in Aomori

石井慶造、*長谷川晃

東北大学

青森県は現在、六ヶ所村に 2017 年度の供用開始をめざす原子力人材育成・研究開発拠点施設の建設を進めている。この施設では、原子力分野を担う人材の育成、原子力産業を支える基盤となる技術の研究開発を通して、原子力施設の安全性の確保、地域振興と経済活性化を行い、青森県の人づくり・産業づくりに貢献することを目的としている。施設は研究棟、R I 棟、研修棟、機械電気棟からなり、実験設備として RI 棟にサイクロトロン加速器や PET-CT、中性子発生装置などが整備される予定になっている。講演では、施設計画のこれまでの経緯、加速器を用いた今後の研究計画（P E T 利用、中性子線利用、元素分析利用）の概要や、建屋および施設整備等についての現状を紹介する。

Keizo Ishii and *Akira Hasegawa

Tohoku Univ.

加速器・ビーム科学部会セッション「東北地方における加速器応用技術の展開」

(2) 山形大学医学部重粒子線がん治療プロジェクトの現状

(2) Current Status of Heavy Ion Radiotherapy Project of Yamagata University Faculty of Medicine

*岩井 岳夫¹, 後藤 彰¹, 根本 建二¹, 山下 英俊¹, 久保田 功¹, 嘉山 孝正¹¹山形大学医学部

1. 背景

重粒子線がん治療は、ヘリウムより重いイオンを数百 MeV/u 程度まで加速器で加速して腫瘍に照射し、がん細胞を死滅させる根治治療法であり、現在ではほとんどの場合炭素イオンを用いて治療が行われている。重粒子線に固有の利点としては、X線や陽子線に抵抗性のがんにも効果が高いこと、分割照射回数が少ないこと、散乱の少ないシャープな線量分布などが挙げられる。この治療法は米国のローレンスバークレー国立研究所で研究が始まったが、千葉市にある放射線医学総合研究所（放医研）の HIMAC(Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba)で大きく発展を遂げた。現在では世界で 10 施設（国内 5 施設）が稼働中で、治療人数では日本が 80%以上を占め、この分野では日本が完全に世界的なイニシアチブを握っている状況にある。また産業として見ても日本の大手電機メーカー 3 社が技術的に先行しており、重粒子線治療を国際的に普及させることは、大幅な輸入超過が続いている医療機器の輸出増を目指す国の方針に沿ったものと言える。

こうした背景を踏まえ、山形大学では東北地方初の重粒子線がん治療施設の設置を目指し、約 10 年前から活動を続けてきた。2012 年度に学長が医学部だけのプロジェクトから全学挙げてのプロジェクトに格上げしたところから設置活動が本格化し、2012 年度と 2013 年度補正予算で研究開発費が措置され、省エネルギー・省スペース・容易なオペレーション・廃棄物低減の 4 つのコンセプトを掲げた「総合病院接続型・国際展開モデル」としての次世代型重粒子線がん治療施設に繋がる研究開発を実施した。2015 年度文部科学省予算において本体装置および建屋の設置のための予算が正式に認められ、現在建屋の設計作業を進めており、2016 年度中には建物の施工に着手する予定である。現計画では平成 30 年度に建物と装置が設置され、平成 31 年秋の治療開始を目指している。

2. 装置の構成

加速器は群馬大学重粒子線医学研究センター用に開発された普及型小型シンクロトロンをベースとしているが、設置に必要な建築面積を最小化するため加速器を地下に配置し、治療室を 2 階に配置する立体的配置を採っている（図 1、重粒子線施設初）。これにより従来の設置面積 3000m²から 2000m²までの縮小を実現する。基本仕様を表 1 に示し、以下にその構成について概略を述べる。

2-1. 入射器

入射器はシンクロトロン本体の内側に配置される。イオン源は先行施設同様 ECR イオン源で、RFQ と DTL で 4MeV/u まで加速して、ストリッパで C⁶⁺に変換してからシンクロトロンに入射する。

2-2. シンクロトロン

シンクロトロンは前述の群馬大学や神奈川県立がんセンター重粒子線治療施設(i-ROCK)と同様の周長で、最大加速エネルギーは 430MeV/u である。先行施設に比べて省エネルギー化や電源の省スペース化が図られたものになる予定である。

2-3. スキャニング照射装置

本施設では従来の重粒子線治療施設で実施されてきた拡大ビーム法を採用せず、放医研で開発されたペンシルビームスキャニング方式を採用している。これにより、線量分布の向上、補償フィルタや患者コリメータなど患者毎の部品/廃棄物の大幅な削減、建物遮蔽条件の緩和などの改善が期待される。また、深さ方向のビーム調整に挿入物を使用せず、加速器のエネルギー変更のみにて調整する。

2-4. 超伝導回転ガントリー

今年 1 月に放医研において世界で初めて超伝導電磁石を使用した重粒子線治療用 360° 回転ガントリーが完成したところであるが[1]（重粒子線用ガントリーとしては常伝導電磁石を用いたハイデルベルク大学に次いで 2 基目）、本施設では 2 号機となる超伝導 360° 回転ガントリーが設置される。放医研の初号機に比べて更なる小型軽量化が図られ、初号機の 300t を大幅に下回るものになる予定である。

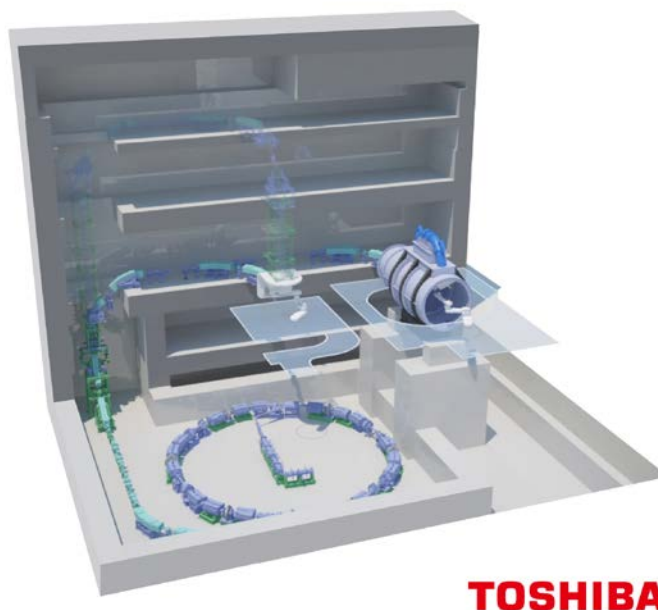


図1 山形大学医学部重粒子線治療施設 主要構成機器の配置図[2]

表1 山形大学医学部重粒子線治療装置の基本仕様

加速イオン	C^{6+}
加速粒子数	3×10^9 ppp 以上
出射ビーム強度	$3 \times 10^7 \sim 1 \times 10^9$ pps 可変
出射エネルギー	50～430MeV/u（可変）、約 600 階調
シンクロトロン周長	63.3m
シンクロトロン偏向電磁石磁場	1.5T 程度
繰り返し周期	最短 6 秒以下、最大フラットトップ時間 30 秒以上
エネルギー変更時間	200ms（飛程 0.5mm ピッチあたり）
スキャニング方式	呼吸同期可能な高速スキャニング
スキャニング速度	水平 80mm/ms 以上、垂直 40mm/ms 以上
回転ガントリーエンドリング直径	約 5.5m
回転ガントリー回転角	$\pm 180^\circ$
回転ガントリー位置決め精度	$\pm 0.2^\circ$

出典

[1] 放医研プレスリリース http://www.nirs.go.jp/information/press/2016/01_08.shtml

[2] 東芝プレスリリース http://www.toshiba.co.jp/about/press/2015_11/pr_j1001.htm

*Takeo Iwai¹, Akira Goto¹, Kenji Nemoto¹, Hidetoshi Yamashita¹, Isao Kubota¹ and Takamasa Kayama¹

¹Yamagata Univ. Faculty of Medicine

加速器・ビーム科学部会セッション「東北地方における加速器応用技術の展開」

(3) 東北大学量子エネルギー工学専攻の 1MV タンデム・バンデグラフ型加速器を用いた加速器実験教育

(3) Accelerator-experiment education using a 1-MV tandem Van de Graaff accelerator at the Department of Quantum Science and Energy Engineering, Tohoku University

*寺川 貴樹, 石井 慶造, 松山 成男, 野上 修平, 福田 誠, 長谷川 晃, 藤澤 政則,
三輪 美沙子, 永谷隆男
東北大学 量子エネルギー工学専攻

1. はじめに

2011年3月11日の東日本大震災で、東北大学 量子エネルギー工学専攻の臨界未満実験室の Cockcroft 加速器（学部学生の実験教育に使用）が全損した．それに替わる新加速器として、米国 National Electrostatics 社製 1MV タンデムバンデグラフ（ペレトロン）加速器システム 3SDH-2 一式が 2014 年 8 月に導入された。本加速器では、最大ターミナル電圧 1 MV により、2 MeV の陽子ビーム、 q 価のイオンの場合には $(q+1)$ MeV のイオンビームが加速可能である。

2. 加速器システムの構成

タンデムバンデグラフ型加速器システムは、負イオン源、入射ライン、加速器本体、出射ライン、および実験用ビームラインから構成されている（図 1）。負イオン源は RF 型イオン源およびセシウムスパッタ型イオン源の 2 機あり、陽子から各種重イオンまで、実験に応じて様々なイオンビームを供給することができる。実験用ビームラインは予算の関係で加速器と同時に導入されていない。現在、学生実験用の 1 つのビームライン（15° ビームライン）のみ設置した状況である。

3. 加速テストおよび学生実験教育

加速テストは、陽子、He、Si、Fe および Au のイオンビームを用いて行われた。15° ビームラインのターゲット位置における最大ビーム強度として、陽子で $10\mu\text{A}$ 、Si で $20\mu\text{A}$ 、Fe で $5\mu\text{A}$ まで得られている。今年度の学生実験では、ステンレス鋼試験片の照射効果について Fe イオンビームによる実験を実施した。なお、学生実験は、旧加速器全損による実験中断以来、4 年ぶりの再開であった。なお、当日のセッションでは、ビーム加速テスト、学生実験および本加速器を利用した実験計画について述べる予定である。

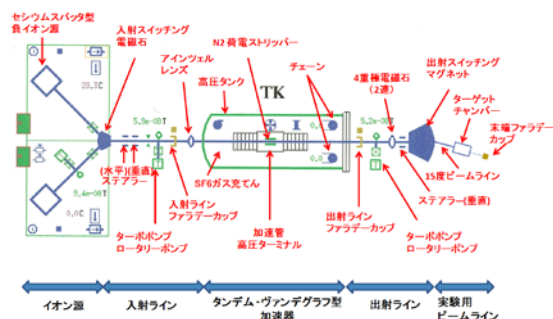


図 1 東北大学 臨界未満実験施設に導入された 1MV タンデムバンデグラフ加速器

*Atsuki Terakawa, Keizo, Ishii, Shigeo Matsuyama, Shuhei Nogami, Makoto Fukuda, Akira Hasegawa, Masanori Fujisawa, Masako Miwa, Takao Nagaya
Tohoku Univ.

[BC07] Basic principles to continuously adopt measures for safety improvements at nuclear power plants(the third session)

Chair: Naoto Sekimura (Univ. of Tokyo)

Mon. Mar 28, 2016 1:00 PM - 2:30 PM Room P (Lecture Rooms C C200)

[BC0701] (1)Ideal status for continuous safety improvement

*Seiichi Koshizuka¹ (1.Univ. of Tokyo)

[BC0702] (2)Summary of the report on basic principles to continuously adopt measures for safety improvements at nuclear power plants

*Tadahiko Kawai¹ (1.JANSI)

[BC0703] (3)General discussion

Naoto Sekimura¹, Seiichi Koshizuka¹, Takehiko Nakamura², Yoshiyuki Narumiya³, Masahide Suzuki⁴ (1.Univ. of Tokyo, 2.JAEA, 3.KEPCO, 4.Nagaoka Univ. of Technol.)

標準委員会セッション3（システム安全専門部会，リスク専門部会合同）

原子力プラントの継続的な安全性向上対策採用の考え方（その3）

Basic principles to continuously adopt measures for safety improvements at nuclear power plants
(the third session)

*越塚 誠一¹，*河井 忠比古²，*関村 直人¹，*中村 武彦³，*成宮 祥介⁴，*鈴木 雅秀⁵

¹東京大学，²JANSI，³JAEA，⁴関西電力，⁵長岡技術科学大学

1. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所事故（以下、福島第一事故という。）に関する各種報告書が、この事故の背後要因の主要なものの1つとし原子力安全のための継続的改善の必要性、重要性を、教訓や提言として出している。安全性向上対策の採否を決定する際には、自主的、強制的を問わず、決定論的評価、確率論的評価、並びに優れた工学的慣行、運転実績や管理措置を考慮に入れて、一貫性がありバランスの取れた選択をすることが大事である。

福島第一事故後に、新規制基準において継続的安全性向上が規定されたが、安全向上対策採否の具体的な考え方については記述されていない。すなわち、新知見をどのようにして反映していくか、リスク重要度とは何か、猶予期間はどうかあるべきか、などについて明らかでない。

そこで、2014年に日本原子力学会標準委員会に安全性向上対策採用の考え方に関するタスク（以下、本タスクという）が設置された。本タスクでは、原子力発電所の安全確保が、科学的、合理的根拠に基づいて総合的にかつ一体的に着実に進展していくように、安全性向上対策採用の考え方に関する国内外の具体論を分析し、自主的、強制的を問わず、統合的な安全性向上対策採用の考え方に係る学会としての考え方を検討してきた。また、日本原子力学会2014年秋の大会および2015年春の年会において、標準委員会セッションとして本タスクでの検討状況を報告してきた。このような経緯を経て、本タスクの報告書を取り纏めることになったので、ここではその紹介をおこなう。

2. 総合的、俯瞰的な安全性向上のための意思決定の考え方

現代の社会を取り巻く環境を見ると、人の快適な生活を脅かすような様々なリスクに囲まれている。このような社会の中で、科学技術の発展や産業活動による経済の発展がもたらすベネフィット（便益）を享受しつつ、それに伴うリスクから人々の生命や財産、社会の秩序をまもるために行われるのが「リスクガバナンス（risk governance）」である。社会環境が複雑化し、リスクも多様化、不確実性が増加する中で、これらのリスクに対応するには、過去の成功事例の手法に学ぶというよりも、失敗を避けて成功のためにリスクをどのように捉えレジリエンスをも考慮してコントロールして行くか、また、リスクは顕現化すると想定して事前の備えを行うインテンジエンスを如何に行うか、が重要となってきた。

【海外における意思決定プロセスの事例】

海外においては、企業や組織が目的達成のために意思決定を行い、業務を遂行する際に生ずるあらゆるリスクを戦略的に最適化し、企業価値の最大化を図るマネジメントを行っている。一方、企業の社会的責任（Corporate Social Responsibility：CSR）も大きく取り上げられ、企業のみならずあらゆる組織において社会のステークホルダー（利害関係者 stakeholder）との関係を抜きにしては適切な意思決定ができない状況と

*Seiichi Koshizuka¹，*Tadahiko Kawai²，*Naoto Sekimura¹，*Takehiko Nakamura³，*Yoshiyuki Narumiya⁴ and *Masahide Suzuki⁵

¹Tokyo Univ.，²JANSI，³JAEA，⁴KEPCO，⁵Nagaoka Univ.

なっている。最近では、このような関係を考慮して、米国の NASA や NRC をはじめ宇宙、防衛、原子力などの先端技術分野では前述のリスクマネジメントを更に拡張して、リスク情報を活用した意思決定プロセス RIDM を組み込むマネジメントシステムを採用し、ステークホルダーとのコミュニケーションを通じて、リスク対応のマネジメントや意思決定の最適化を図ることが広く進められている。



図表 19 NASA RIDM プロセスでの役割とインターフェース

3. 安全性向上対策採用に係る海外事例検討

本章では、安全性向上に向けたシビアアクシデント対策導入のための米国、英国における代表的な意思決定手法について、リスク情報活用を含めた基本的考え方、適用事例及び規制機関、産業界の動向等に関する調査を行った。

米国では、既設炉における法規制の制改定や規制要件の見直し等により、安全性の実質的な向上とこれに係る費用等の正当性についてバリュー・インパクト分析を行い、NRC が最終的な規制を決定するバックフィット、既設炉または新設炉を対象に各々シビアアクシデント時における影響緩和代替案、または設計代替案に対してコスト・ベネフィット評価を行って判断する SAMA、SAMDA がある。

一方、英国では、基本安全限度（BSL）、基本安全目標（BSO）が数値基準として設定され、これらの間のリスク受忍可能範囲内（ALARP）でリスク低減を図る安全評価原則（SAP）の考え方がある。英国では、規制当局がこれらの数値基準に基づいて事業者の安全性向上活動のプロセス及び安全性向上対策の妥当性について評価を行っている。

【米国、英国での安全性向上対策採用に関する主な評価事例の概要】

(1) 米国におけるバリュー・インパクト分析の検討例

SBO 規則に関しては、1988 年に NRC は国内 100 プラントを対象に規制措置代替案実施に伴うバリュー（公衆被ばくの低減、環境の改善及びリスク等の低減）とインパクト（安全、環境及び経済性等への悪影響）を定量評価し、評価基準の 2.4 倍のバリューが得られることを確認した。一方、NRC によるフィルター・ベントの設置に関するバリュー・インパクト分析では、インパクトがバリューを大幅に上回り、対費用効果が無いことが確認された。その後、NRC と産業界との間で成立性に関する活発な議論がなされたものの、最終的には 2015 年にフィルター・ベントの設置義務化を成文化しないことが NRC で正式に決定された。

また、新設炉の SAMA/SAMDA 評価としては、ABWR、ESBWR、AP1000、EPR、APWR、APR1400 等の型式認定申請の事例があるが、標準設計以上のシビアアクシデント対応代替案や改良案がいずれも

バリュー・インパクト上効果的ではないことが示されている。

(2) 英国における定量的 ALARP 評価の実施事例

GDA の評価において、EPR では、ALARP 評価に供する設計代替案 7 案を選定し、定量的 ALARP 評価を行い、設計代替案のコストを設計代替案実施によるリスク低減と比較した結果、代替設計案のいずれもコスト上効果的ではないことが確認された。また、AP1000 でも、ALARP 評価に供する設計代替案 (14 案)、設計改良案 (2 案) を選定し、定量的 ALARP 評価を行ったが、同様に設計代替案及び設計改良案のいずれもコスト上効果的ではないことが確認された。

既設炉である Sizewell B の定期安全レビューやストレステストに際しても ALARP に関する評価が行われ、得られた結果、検討課題に基づいて事業者は改善すべき領域を摘出し、適切な安全性向上策を実施してゆくとしている。

4. 安全性向上対策の採用に係る意思決定プロセスの在り方と課題

【安全性向上への取り組みの基本となる考え方】

原子力発電所の安全確保の達成のためには、全てのステークホルダー（規制当局・電力事業者・メーカー・学術団体・地域住民・一般市民等）が、合理的に実行可能な限り出来るだけリスクを低くするという ALARA の考え方の下、それぞれの役割における取組みに継続的な改善を行ない、安全性向上に努める必要がある。

また、ステークホルダーからの理解という社会的な視点や、安全目標に照らしてどこまで安全性を向上させるべきかという視点、深層防護や防災による対応をどこまで行うべきかという視点、など色々な要素を考慮したうえで、総合的にリスクを低減することが重要である。ソフトウェア・ハードウェア・マネジメントにまで至る種々の策の実施において必要となるリソース（人的資源、費用）は無限大に存在する訳ではなく、効果的に配分する必要がある。

原子力事業は社会的リスクを伴うものであるが故に、適切なリスクガバナンスの枠組みの下で、各組織は、常に安全性向上の更なる高みを目指して適切なリスクマネジメントを実施する必要がある。また、多様なステークホルダーとのコミュニケーションを行い、日々変化していく原子力安全を巡る社会情勢、社会風土等と整合を図る。

上記の 2.及び 3.でまとめられている意思決定の考え方に関する国内外の調査結果を参考とし、包括的・継続的な安全性向上の枠組みを図 5-1 に示すように描いた。

【安全性向上の枠組みを踏まえた統合的意思決定プロセス】

安全性向上を目指して種々の意思決定をする際に、どのように考え、どのように評価し、どのような手順で決定することが適切であるか、実効的であるかを考察し、個々の実施事項とその関係性を明らかにした統合的意思決定プロセスを図 5-2 に示した。本プロセスを参考に、各組織の実態に応じて、確実に展開されていくことが重要である。

「問題の設定」では、取り組むべき対象、目標、解決の方向性を明確にするとともに、問題のプロフィールの把握を行う。最新の科学的知見や社会的要求、対策の実効性評価の結果等が契機となる。「選択肢候補の考案」では、対策の実行可能性にかかわらず、複数の幅広い対策を選択肢候補として考案する。「統合的な分析」では、各キーエレメントの観点からの分析、キーエレメントの相対的な重み付け、を行い選択肢候補から選択肢として提案するとともに、その分析結果を意思決定者の判断材料としてまとめる。ここでは、分析におけるバイアスの排除のため、専門家パネルを活用することも有効である。「意思決定（選択肢の採否の決定）」では、「統合的な分析」から得られた選択肢と分析結果に基づき、選択肢の採否に係る意思決定を行う。「意思決定結果の実施」では、採用した対策を計画に従い確実に実施するとともに、想定を

超える事態に対し適切な対応が出来るよう、体制、工程、マネジメント策定などを行う。「モニタリングと実効性の評価」では、実施した対策の実効性の評価や、意思決定時の前提に変化がないかのモニタリングを行い、見直すべきとなった場合には、「問題の設定」に戻り、再度プロセスを廻し検討する。上記のプロセスを通じて、各実施項目内及び実施項目間では組織内・組織外とのコミュニケーションを行うとともに、意思決定プロセスの文書化、体制などもプロセスを進める上では重要となる。

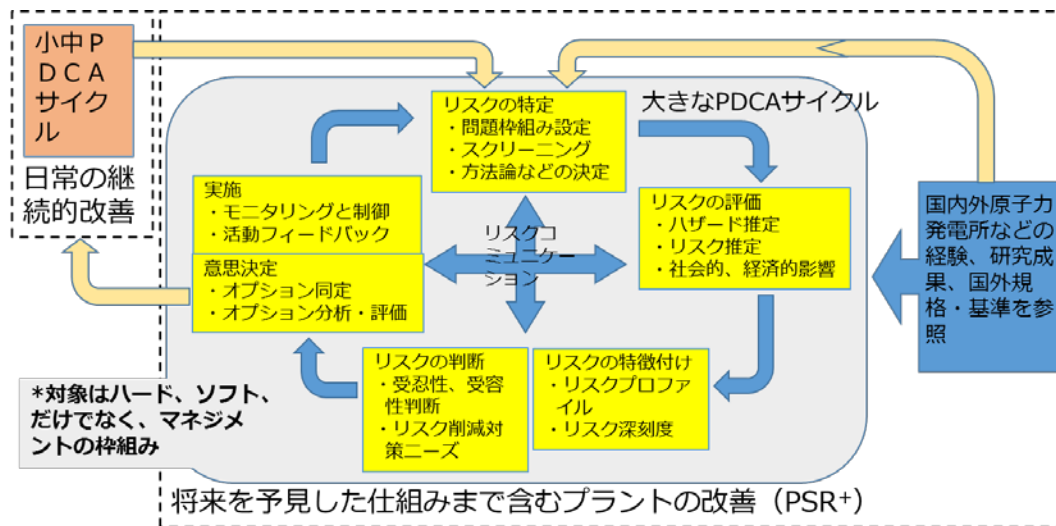


図 5-1 包括的・継続的な安全性向上の枠組み

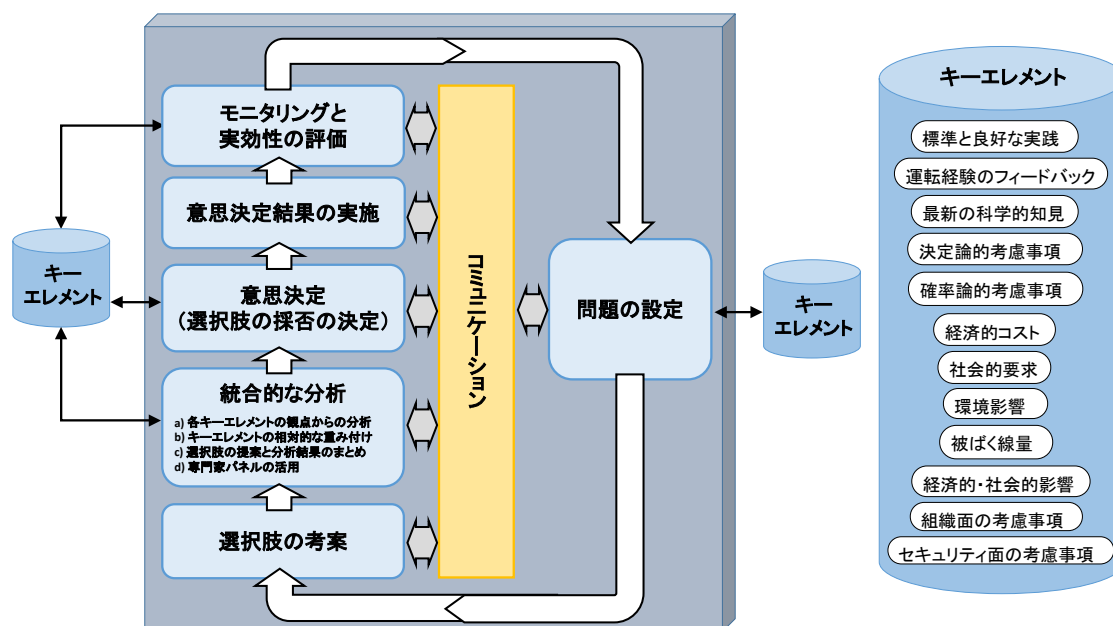


図 5-2 統合的意思決定プロセス

5. 安全性向上の対応策を講じる際の意思決定の実施手順の提案(例示)

本章では上記の 4. で提唱された統合的意思決定プロセスを参考に、具体的な事例について意思決定の具体的な対策を事例として取り上げ、意思決定の実施手順と関連付けてその内容を検討、整理し、課題を摘出する。事例として、以下の 4 つの事例について意思決定の実施手順と関連付けて整理を試みた。

- ・安全上評価すべき重要事故シナシグループ 選定検討における統合的意思決定プロセス

- ・ ATWS 対策
- ・ SBO 対策
- ・ 自然現象及び人為事象に対する安全対策検討における統合的意思決定プロセス

上記の事例検討から以下の課題を抽出した。

6. まとめ

本タスクにおいては、安全性向上対策に関する意思決定の国内外の事例を分析、評価しつつ、継続的な安全性向上のあり方、考え方を整理し纏め、そこから実際に安全性向上の意思決定を行おうとした時に解決しておくべき重要な課題を抽出した。これらの課題に対して、我が国の現状を踏まえつつ、本タスクにおいて今後の進め方を議論した結果、当面急ぐ課題対応としては下記の2点が合意された。

- ・ 関係組織が新知見の共有、評価を行えるような作業会を設置する。
- ・ コスト・ベネフィット解析の実施の考え方の標準作り、及び意思決定プロセスをさらに具体化した標準作りを推進する。

標準委員会セッション3（システム安全専門部会，リスク専門部会合同）

原子力プラントの継続的な安全性向上対策採用の考え方（その3）

Basic principles to continuously adopt measures for safety improvements at nuclear power plants
(the third session)

*越塚 誠一¹，*河井 忠比古²，*関村 直人¹，*中村 武彦³，*成宮 祥介⁴，*鈴木 雅秀⁵

¹東京大学，²JANSI，³JAEA，⁴関西電力，⁵長岡技術科学大学

1. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所事故（以下、福島第一事故という。）に関する各種報告書が、この事故の背後要因の主要なものの1つとし原子力安全のための継続的改善の必要性、重要性を、教訓や提言として出している。安全性向上対策の採否を決定する際には、自主的、強制的を問わず、決定論的評価、確率論的評価、並びに優れた工学的慣行、運転実績や管理措置を考慮に入れて、一貫性がありバランスの取れた選択をすることが大事である。

福島第一事故後に、新規制基準において継続的安全性向上が規定されたが、安全向上対策採否の具体的な考え方については記述されていない。すなわち、新知見をどのようにして反映していくか、リスク重要度とは何か、猶予期間はどうかあるべきか、などについて明らかでない。

そこで、2014年に日本原子力学会標準委員会に安全性向上対策採用の考え方に関するタスク（以下、本タスクという）が設置された。本タスクでは、原子力発電所の安全確保が、科学的、合理的根拠に基づいて総合的にかつ一体的に着実に進展していくように、安全性向上対策採用の考え方に関する国内外の具体論を分析し、自主的、強制的を問わず、統合的な安全性向上対策採用の考え方に係る学会としての考え方を検討してきた。また、日本原子力学会2014年秋の大会および2015年春の年会において、標準委員会セッションとして本タスクでの検討状況を報告してきた。このような経緯を経て、本タスクの報告書を取り纏めることになったので、ここではその紹介をおこなう。

2. 総合的、俯瞰的な安全性向上のための意思決定の考え方

現代の社会を取り巻く環境を見ると、人の快適な生活を脅かすような様々なリスクに囲まれている。このような社会の中で、科学技術の発展や産業活動による経済の発展がもたらすベネフィット（便益）を享受しつつ、それに伴うリスクから人々の生命や財産、社会の秩序をまもるために行われるのが「リスクガバナンス（risk governance）」である。社会環境が複雑化し、リスクも多様化、不確実性が増加する中で、これらのリスクに対応するには、過去の成功事例の手法に学ぶというよりも、失敗を避けて成功のためにリスクをどのように捉えレジリエンスをも考慮してコントロールして行くか、また、リスクは顕現化すると想定して事前の備えを行うインテンジエンスを如何に行うか、が重要となってきた。

【海外における意思決定プロセスの事例】

海外においては、企業や組織が目的達成のために意思決定を行い、業務を遂行する際に生ずるあらゆるリスクを戦略的に最適化し、企業価値の最大化を図るマネジメントを行っている。一方、企業の社会的責任（Corporate Social Responsibility：CSR）も大きく取り上げられ、企業のみならずあらゆる組織において社会のステークホルダー（利害関係者 stakeholder）との関係を抜きにしては適切な意思決定ができない状況と

*Seiichi Koshizuka¹，*Tadahiko Kawai²，*Naoto Sekimura¹，*Takehiko Nakamura³，*Yoshiyuki Narumiya⁴ and *Masahide Suzuki⁵

¹Tokyo Univ.，²JANSI，³JAEA，⁴KEPCO，⁵Nagaoka Univ.

なっている。最近では、このような関係を考慮して、米国の NASA や NRC をはじめ宇宙、防衛、原子力などの先端技術分野では前述のリスクマネジメントを更に拡張して、リスク情報を活用した意思決定プロセス RIDM を組み込むマネジメントシステムを採用し、ステークホルダーとのコミュニケーションを通じて、リスク対応のマネジメントや意思決定の最適化を図ることが広く進められている。



図表 19 NASA RIDM プロセスでの役割とインターフェース

3. 安全性向上対策採用に係る海外事例検討

本章では、安全性向上に向けたシビアアクシデント対策導入のための米国、英国における代表的な意思決定手法について、リスク情報活用を含めた基本的考え方、適用事例及び規制機関、産業界の動向等に関する調査を行った。

米国では、既設炉における法規制の制改定や規制要件の見直し等により、安全性の実質的な向上とこれに係る費用等の正当性についてバリュー・インパクト分析を行い、NRC が最終的な規制を決定するバックフィット、既設炉または新設炉を対象に各々シビアアクシデント時における影響緩和代替案、または設計代替案に対してコスト・ベネフィット評価を行って判断する SAMA、SAMDA がある。

一方、英国では、基本安全限度（BSL）、基本安全目標（BSO）が数値基準として設定され、これらの間のリスク受忍可能範囲内（ALARP）でリスク低減を図る安全評価原則（SAP）の考え方がある。英国では、規制当局がこれらの数値基準に基づいて事業者の安全性向上活動のプロセス及び安全性向上対策の妥当性について評価を行っている。

【米国、英国での安全性向上対策採用に関する主な評価事例の概要】

(1) 米国におけるバリュー・インパクト分析の検討例

SBO 規則に関しては、1988 年に NRC は国内 100 プラントを対象に規制措置代替案実施に伴うバリュー（公衆被ばくの低減、環境の改善及びリスク等の低減）とインパクト（安全、環境及び経済性等への悪影響）を定量評価し、評価基準の 2.4 倍のバリューが得られることを確認した。一方、NRC によるフィルター・ベントの設置に関するバリュー・インパクト分析では、インパクトがバリューを大幅に上回り、対費用効果が無いことが確認された。その後、NRC と産業界との間で成立性に関する活発な議論がなされたものの、最終的には 2015 年にフィルター・ベントの設置義務化を成文化しないことが NRC で正式に決定された。

また、新設炉の SAMA/SAMDA 評価としては、ABWR、ESBWR、AP1000、EPR、APWR、APR1400 等の型式認定申請の事例があるが、標準設計以上のシビアアクシデント対応代替案や改良案がいずれも

バリュー・インパクト上効果的ではないことが示されている。

(2) 英国における定量的 ALARP 評価の実施事例

GDA の評価において、EPR では、ALARP 評価に供する設計代替案 7 案を選定し、定量的 ALARP 評価を行い、設計代替案のコストを設計代替案実施によるリスク低減と比較した結果、代替設計案のいずれもコスト上効果的ではないことが確認された。また、AP1000 でも、ALARP 評価に供する設計代替案 (14 案)、設計改良案 (2 案) を選定し、定量的 ALARP 評価を行ったが、同様に設計代替案及び設計改良案のいずれもコスト上効果的ではないことが確認された。

既設炉である Sizewell B の定期安全レビューやストレステストに際しても ALARP に関する評価が行われ、得られた結果、検討課題に基づいて事業者は改善すべき領域を摘出し、適切な安全性向上策を実施してゆくとしている。

4. 安全性向上対策の採用に係る意思決定プロセスの在り方と課題

【安全性向上への取り組みの基本となる考え方】

原子力発電所の安全確保の達成のためには、全てのステークホルダー（規制当局・電力事業者・メーカー・学術団体・地域住民・一般市民等）が、合理的に実行可能な限り出来るだけリスクを低くするという ALARA の考え方の下、それぞれの役割における取組みに継続的な改善を行ない、安全性向上に努める必要がある。

また、ステークホルダーからの理解という社会的な視点や、安全目標に照らしてどこまで安全性を向上させるべきかという視点、深層防護や防災による対応をどこまで行うべきかという視点、など色々な要素を考慮したうえで、総合的にリスクを低減することが重要である。ソフトウェア・ハードウェア・マネジメントにまで至る種々の策の実施において必要となるリソース（人的資源、費用）は無限大に存在する訳ではなく、効果的に配分する必要がある。

原子力事業は社会的リスクを伴うものであるが故に、適切なリスクガバナンスの枠組みの下で、各組織は、常に安全性向上の更なる高みを目指して適切なリスクマネジメントを実施する必要がある。また、多様なステークホルダーとのコミュニケーションを行い、日々変化していく原子力安全を巡る社会情勢、社会風土等と整合を図る。

上記の 2.及び 3.でまとめられている意思決定の考え方に関する国内外の調査結果を参考とし、包括的・継続的な安全性向上の枠組みを図 5-1 に示すように描いた。

【安全性向上の枠組みを踏まえた統合的意思決定プロセス】

安全性向上を目指して種々の意思決定をする際に、どのように考え、どのように評価し、どのような手順で決定することが適切であるか、実効的であるかを考察し、個々の実施事項とその関係性を明らかにした統合的意思決定プロセスを図 5-2 に示した。本プロセスを参考に、各組織の実態に応じて、確実に展開されていくことが重要である。

「問題の設定」では、取り組むべき対象、目標、解決の方向性を明確にするとともに、問題のプロフィールの把握を行う。最新の科学的知見や社会的要求、対策の実効性評価の結果等が契機となる。「選択肢候補の考案」では、対策の実行可能性にかかわらず、複数の幅広い対策を選択肢候補として考案する。「統合的な分析」では、各キーエレメントの観点からの分析、キーエレメントの相対的な重み付け、を行い選択肢候補から選択肢として提案するとともに、その分析結果を意思決定者の判断材料としてまとめる。ここでは、分析におけるバイアスの排除のため、専門家パネルを活用することも有効である。「意思決定（選択肢の採否の決定）」では、「統合的な分析」から得られた選択肢と分析結果に基づき、選択肢の採否に係る意思決定を行う。「意思決定結果の実施」では、採用した対策を計画に従い確実に実施するとともに、想定を

超える事態に対し適切な対応が出来るよう、体制、工程、マネジメント策定などを行う。「モニタリングと実効性の評価」では、実施した対策の実効性の評価や、意思決定時の前提に変化がないかのモニタリングを行い、見直すべきとなった場合には、「問題の設定」に戻り、再度プロセスを廻し検討する。上記のプロセスを通じて、各実施項目内及び実施項目間では組織内・組織外とのコミュニケーションを行うとともに、意思決定プロセスの文書化、体制などもプロセスを進める上では重要となる。

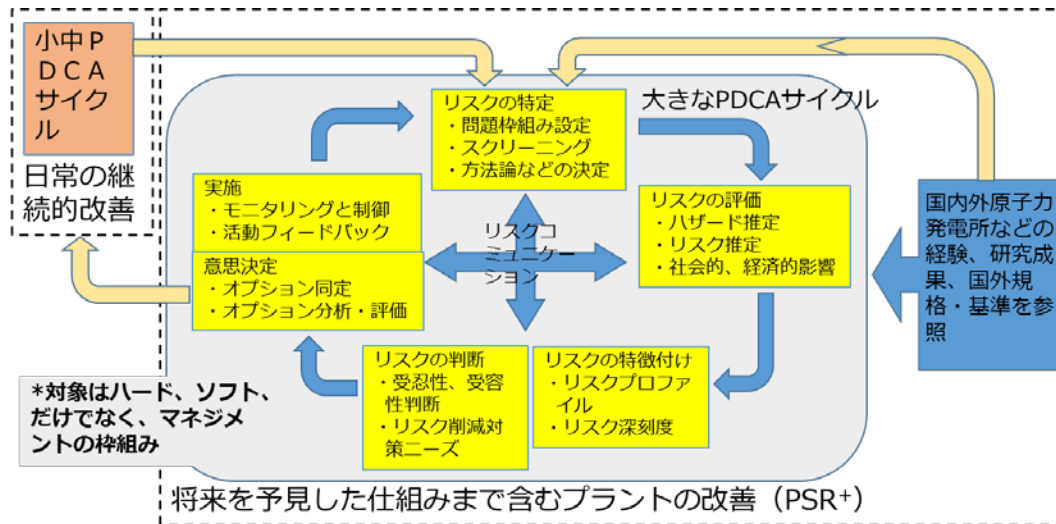


図 5-1 包括的・継続的な安全性向上の枠組み

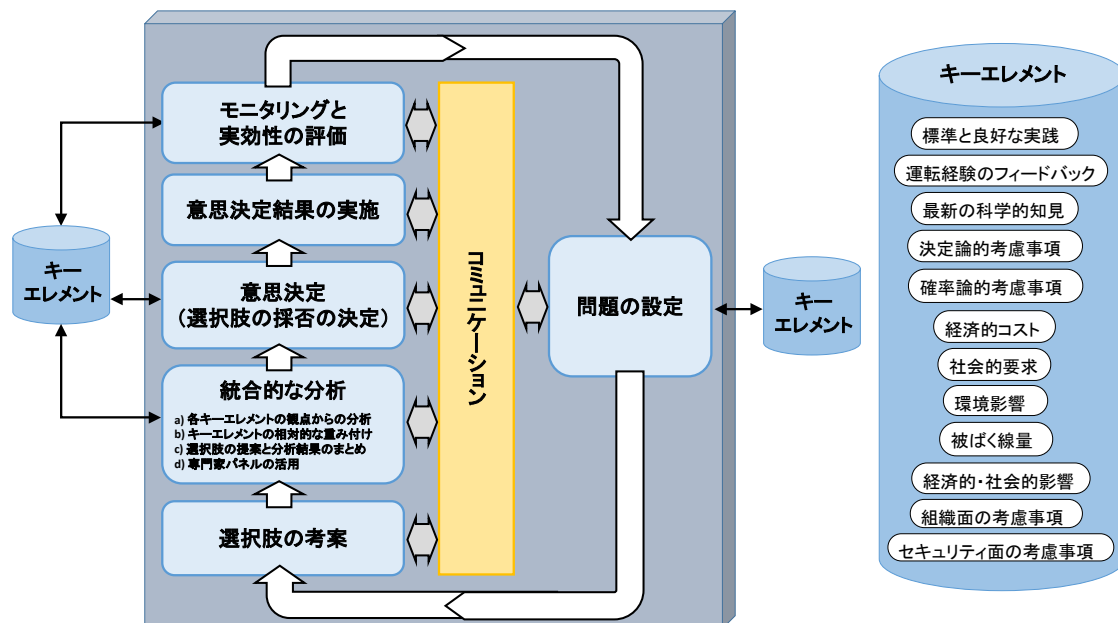


図 5-2 統合的意思決定プロセス

5. 安全性向上の対応策を講じる際の意思決定の実施手順の提案(例示)

本章では上記の 4. で提唱された統合的意思決定プロセスを参考に、具体的な事例について意思決定の具体的な対策を事例として取り上げ、意思決定の実施手順と関連付けてその内容を検討、整理し、課題を摘出する。事例として、以下の 4 つの事例について意思決定の実施手順と関連付けて整理を試みた。

- ・安全上評価すべき重要事故シナリオグループ 選定検討における統合的意思決定プロセス

- ・ ATWS 対策
- ・ SBO 対策
- ・ 自然現象及び人為事象に対する安全対策検討における統合的意思決定プロセス

上記の事例検討から以下の課題を抽出した。

6. まとめ

本タスクにおいては、安全性向上対策に関する意思決定の国内外の事例を分析、評価しつつ、継続的な安全性向上のあり方、考え方を整理し纏め、そこから実際に安全性向上の意思決定を行おうとした時に解決しておくべき重要な課題を抽出した。これらの課題に対して、我が国の現状を踏まえつつ、本タスクにおいて今後の進め方を議論した結果、当面急ぐ課題対応としては下記の2点が合意された。

- ・ 関係組織が新知見の共有、評価を行えるような作業会を設置する。
- ・ コスト・ベネフィット解析の実施の考え方の標準作り、及び意思決定プロセスをさらに具体化した標準作りを推進する。

標準委員会セッション3（システム安全専門部会，リスク専門部会合同）

原子力プラントの継続的な安全性向上対策採用の考え方（その3）

Basic principles to continuously adopt measures for safety improvements at nuclear power plants
(the third session)

*越塚 誠一¹，*河井 忠比古²，*関村 直人¹，*中村 武彦³，*成宮 祥介⁴，*鈴木 雅秀⁵

¹東京大学，²JANSI，³JAEA，⁴関西電力，⁵長岡技術科学大学

1. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所事故（以下、福島第一事故という。）に関する各種報告書が、この事故の背後要因の主要なものの1つとし原子力安全のための継続的改善の必要性、重要性を、教訓や提言として出している。安全性向上対策の採否を決定する際には、自主的、強制的を問わず、決定論的評価、確率論的評価、並びに優れた工学的慣行、運転実績や管理措置を考慮に入れて、一貫性がありバランスの取れた選択をすることが大事である。

福島第一事故後に、新規制基準において継続的安全性向上が規定されたが、安全向上対策採否の具体的な考え方については記述されていない。すなわち、新知見をどのようにして反映していくか、リスク重要度とは何か、猶予期間はどうかあるべきか、などについて明らかでない。

そこで、2014年に日本原子力学会標準委員会に安全性向上対策採用の考え方に関するタスク（以下、本タスクという）が設置された。本タスクでは、原子力発電所の安全確保が、科学的、合理的根拠に基づいて総合的にかつ一体的に着実に進展していくように、安全性向上対策採用の考え方に関する国内外の具体論を分析し、自主的、強制的を問わず、統合的な安全性向上対策採用の考え方に係る学会としての考え方を検討してきた。また、日本原子力学会 2014 年秋の大会および 2015 年春の年会において、標準委員会セッションとして本タスクでの検討状況を報告してきた。このような経緯を経て、本タスクの報告書を取り纏めることになったので、ここではその紹介をおこなう。

2. 総合的、俯瞰的な安全性向上のための意思決定の考え方

現代の社会を取り巻く環境を見ると、人の快適な生活を脅かすような様々なリスクに囲まれている。このような社会の中で、科学技術の発展や産業活動による経済の発展がもたらすベネフィット（便益）を享受しつつ、それに伴うリスクから人々の生命や財産、社会の秩序をまもるために行われるのが「リスクガバナンス（risk governance）」である。社会環境が複雑化し、リスクも多様化、不確実性が増加する中で、これらのリスクに対応するには、過去の成功事例の手法に学ぶというよりも、失敗を避けて成功のためにリスクをどのように捉えレジリエンスをも考慮してコントロールして行くか、また、リスクは顕現化すると想定して事前の備えを行うインテンジエンスを如何に行うか、が重要となってきた。

【海外における意思決定プロセスの事例】

海外においては、企業や組織が目的達成のために意思決定を行い、業務を遂行する際に生ずるあらゆるリスクを戦略的に最適化し、企業価値の最大化を図るマネジメントを行っている。一方、企業の社会的責任（Corporate Social Responsibility：CSR）も大きく取り上げられ、企業のみならずあらゆる組織において社会のステークホルダー（利害関係者 stakeholder）との関係を抜きにしては適切な意思決定ができない状況と

*Seiichi Koshizuka¹，*Tadahiko Kawai²，*Naoto Sekimura¹，*Takehiko Nakamura³，*Yoshiyuki Narumiya⁴ and *Masahide Suzuki⁵

¹Tokyo Univ.，²JANSI，³JAEA，⁴KEPCO，⁵Nagaoka Univ.

なっている。最近では、このような関係を考慮して、米国の NASA や NRC をはじめ宇宙、防衛、原子力などの先端技術分野では前述のリスクマネジメントを更に拡張して、リスク情報を活用した意思決定プロセス RIDM を組み込むマネジメントシステムを採用し、ステークホルダーとのコミュニケーションを通じて、リスク対応のマネジメントや意思決定の最適化を図ることが広く進められている。



図表 19 NASA RIDM プロセスでの役割とインターフェース

3. 安全性向上対策採用に係る海外事例検討

本章では、安全性向上に向けたシビアアクシデント対策導入のための米国、英国における代表的な意思決定手法について、リスク情報活用を含めた基本的考え方、適用事例及び規制機関、産業界の動向等に関する調査を行った。

米国では、既設炉における法規制の制改定や規制要件の見直し等により、安全性の実質的な向上とこれに係る費用等の正当性についてバリュー・インパクト分析を行い、NRC が最終的な規制を決定するバックフィット、既設炉または新設炉を対象に各々シビアアクシデント時における影響緩和代替案、または設計代替案に対してコスト・ベネフィット評価を行って判断する SAMA、SAMDA がある。

一方、英国では、基本安全限度（BSL）、基本安全目標（BSO）が数値基準として設定され、これらの間のリスク受忍可能範囲内（ALARP）でリスク低減を図る安全評価原則（SAP）の考え方がある。英国では、規制当局がこれらの数値基準に基づいて事業者の安全性向上活動のプロセス及び安全性向上対策の妥当性について評価を行っている。

【米国、英国での安全性向上対策採用に関する主な評価事例の概要】

(1) 米国におけるバリュー・インパクト分析の検討例

SBO 規則に関しては、1988 年に NRC は国内 100 プラントを対象に規制措置代替案実施に伴うバリュー（公衆被ばくの低減、環境の改善及びリスク等の低減）とインパクト（安全、環境及び経済性等への悪影響）を定量評価し、評価基準の 2.4 倍のバリューが得られることを確認した。一方、NRC によるフィルター・ベントの設置に関するバリュー・インパクト分析では、インパクトがバリューを大幅に上回り、対費用効果が無いことが確認された。その後、NRC と産業界との間で成立性に関する活発な議論がなされたものの、最終的には 2015 年にフィルター・ベントの設置義務化を成文化しないことが NRC で正式に決定された。

また、新設炉の SAMA/SAMDA 評価としては、ABWR、ESBWR、AP1000、EPR、APWR、APR1400 等の型式認定申請の事例があるが、標準設計以上のシビアアクシデント対応代替案や改良案がいずれも

バリュー・インパクト上効果的ではないことが示されている。

(2) 英国における定量的 ALARP 評価の実施事例

GDA の評価において、EPR では、ALARP 評価に供する設計代替案 7 案を選定し、定量的 ALARP 評価を行い、設計代替案のコストを設計代替案実施によるリスク低減と比較した結果、代替設計案のいずれもコスト上効果的ではないことが確認された。また、AP1000 でも、ALARP 評価に供する設計代替案 (14 案)、設計改良案 (2 案) を選定し、定量的 ALARP 評価を行ったが、同様に設計代替案及び設計改良案のいずれもコスト上効果的ではないことが確認された。

既設炉である Sizewell B の定期安全レビューやストレステストに際しても ALARP に関する評価が行われ、得られた結果、検討課題に基づいて事業者は改善すべき領域を摘出し、適切な安全性向上策を実施してゆくとしている。

4. 安全性向上対策の採用に係る意思決定プロセスの在り方と課題

【安全性向上への取り組みの基本となる考え方】

原子力発電所の安全確保の達成のためには、全てのステークホルダー（規制当局・電力事業者・メーカー・学術団体・地域住民・一般市民等）が、合理的に実行可能な限り出来るだけリスクを低くするという ALARA の考え方の下、それぞれの役割における取組みに継続的な改善を行ない、安全性向上に努める必要がある。

また、ステークホルダーからの理解という社会的な視点や、安全目標に照らしてどこまで安全性を向上させるべきかという視点、深層防護や防災による対応をどこまで行うべきかという視点、など色々な要素を考慮したうえで、総合的にリスクを低減することが重要である。ソフトウェア・ハードウェア・マネジメントにまで至る種々の策の実施において必要となるリソース（人的資源、費用）は無限大に存在する訳ではなく、効果的に配分する必要がある。

原子力事業は社会的リスクを伴うものであるが故に、適切なリスクガバナンスの枠組みの下で、各組織は、常に安全性向上の更なる高みを目指して適切なリスクマネジメントを実施する必要がある。また、多様なステークホルダーとのコミュニケーションを行い、日々変化していく原子力安全を巡る社会情勢、社会風土等と整合を図る。

上記の 2.及び 3.でまとめられている意思決定の考え方に関する国内外の調査結果を参考とし、包括的・継続的な安全性向上の枠組みを図 5-1 に示すように描いた。

【安全性向上の枠組みを踏まえた統合的意思決定プロセス】

安全性向上を目指して種々の意思決定をする際に、どのように考え、どのように評価し、どのような手順で決定することが適切であるか、実効的であるかを考察し、個々の実施事項とその関係性を明らかにした統合的意思決定プロセスを図 5-2 に示した。本プロセスを参考に、各組織の実態に応じて、確実に展開されていくことが重要である。

「問題の設定」では、取り組むべき対象、目標、解決の方向性を明確にするとともに、問題のプロフィールの把握を行う。最新の科学的知見や社会的要求、対策の実効性評価の結果等が契機となる。「選択肢候補の考案」では、対策の実行可能性にかかわらず、複数の幅広い対策を選択肢候補として考案する。「統合的な分析」では、各キーエレメントの観点からの分析、キーエレメントの相対的な重み付け、を行い選択肢候補から選択肢として提案するとともに、その分析結果を意思決定者の判断材料としてまとめる。ここでは、分析におけるバイアスの排除のため、専門家パネルを活用することも有効である。「意思決定（選択肢の採否の決定）」では、「統合的な分析」から得られた選択肢と分析結果に基づき、選択肢の採否に係る意思決定を行う。「意思決定結果の実施」では、採用した対策を計画に従い確実に実施するとともに、想定を

超える事態に対し適切な対応が出来るよう、体制、工程、マネジメント策定などを行う。「モニタリングと実効性の評価」では、実施した対策の実効性の評価や、意思決定時の前提に変化がないかのモニタリングを行い、見直すべきとなった場合には、「問題の設定」に戻り、再度プロセスを廻し検討する。上記のプロセスを通じて、各実施項目内及び実施項目間では組織内・組織外とのコミュニケーションを行うとともに、意思決定プロセスの文書化、体制などもプロセスを進める上では重要となる。

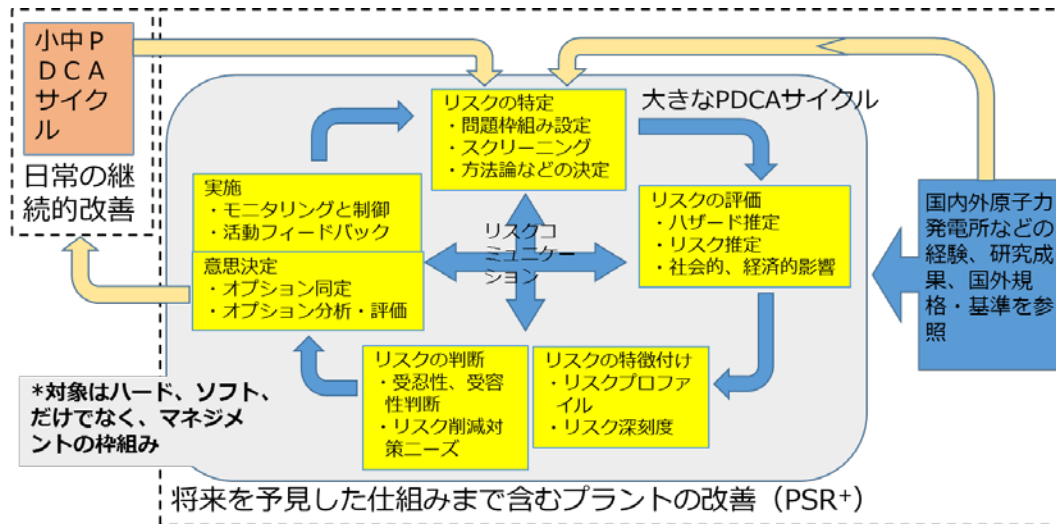


図 5-1 包括的・継続的な安全性向上の枠組み

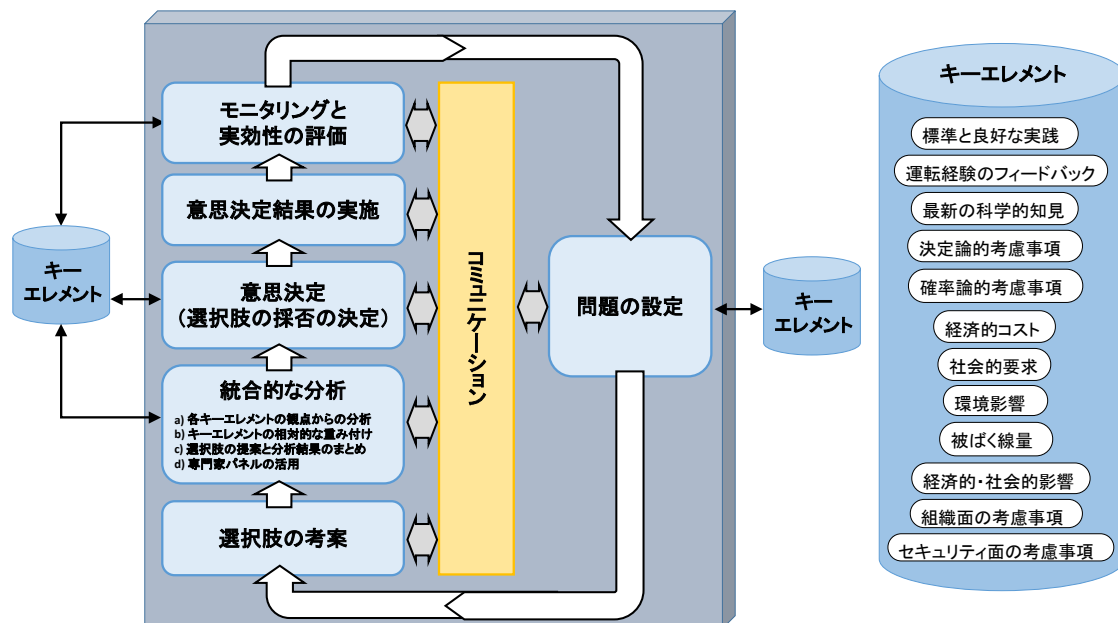


図 5-2 統合的意思決定プロセス

5. 安全性向上の対応策を講じる際の意思決定の実施手順の提案(例示)

本章では上記の 4. で提唱された統合的意思決定プロセスを参考に、具体的な事例について意思決定の具体的な対策を事例として取り上げ、意思決定の実施手順と関連付けてその内容を検討、整理し、課題を摘出する。事例として、以下の 4 つの事例について意思決定の実施手順と関連付けて整理を試みた。

- ・安全上評価すべき重要事故シナリオグループ 選定検討における統合的意思決定プロセス

- ・ ATWS 対策
- ・ SBO 対策
- ・ 自然現象及び人為事象に対する安全対策検討における統合的意思決定プロセス

上記の事例検討から以下の課題を抽出した。

6. まとめ

本タスクにおいては、安全性向上対策に関する意思決定の国内外の事例を分析、評価しつつ、継続的な安全性向上のあり方、考え方を整理し纏め、そこから実際に安全性向上の意思決定を行おうとした時に解決しておくべき重要な課題を抽出した。これらの課題に対して、我が国の現状を踏まえつつ、本タスクにおいて今後の進め方を議論した結果、当面急ぐ課題対応としては下記の2点が合意された。

- ・ 関係組織が新知見の共有、評価を行えるような作業会を設置する。
- ・ コスト・ベネフィット解析の実施の考え方の標準作り、及び意思決定プロセスをさらに具体化した標準作りを推進する。