

企画セッション | 部会・連絡会セッション：核融合工学部会

2024年9月12日(木) 13:00 ~ 14:30 B会場(講義棟A棟1F A102)

[2B_PL] 核融合炉の潜在的リスク

座長:谷川 博康(QST)

[2B_PL01]

フュージョンエネルギー安全確保検討TFの状況

*近藤 寛子¹ (1. マトリクスK)

[2B_PL02]

原子力学会での研究専門委員会の状況

*林 巧¹ (1. QST)

[2B_PL03]

磁場閉じ込め核融合施設のリスクと対策検討

*染谷 洋二¹ (1. QST)

[2B_PL04]

施設外でのRIの環境動態

*横山 須美¹ (1. 長崎大)

[2B_PL05]

レーザー核融合施設での潜在的リスク

*重森 啓介¹ (1. 阪大)

[2B_PL06]

総合討論

核融合工学部会セッション

核融合炉の潜在的リスク

Potential risks of fusion reactors

(1)フュージョンエネルギー安全確保検討 TF の状況

(1) Overview of Fusion Energy Safety Consideration Task Force

*近藤 寛子¹,¹マトリクス K

1. はじめに

フュージョンエネルギーに関する国内外における急速な変化を背景に、日本では、2023年4月にフュージョンエネルギー分野初の国家戦略である「フュージョンエネルギー・イノベーション戦略」を策定した。続く、2024年3月には、安全規制の検討の前提となり得る「安全確保の基本的な考え方」を検討するためのタスクフォース（以下、TF）が、内閣府の核融合戦略有識者会議の下に設置された。

本稿では、同TFにおける検討状況を扱う。

2. 国内におけるフュージョンエネルギー関係の規制の現状について

原子力基本法において、「原子力」とは「原子核変換の過程において原子核から放出されるすべてのエネルギー」と規定されており、原子核変換には、核分裂反応や核融合反応が含まれる。また、「原子炉」とは、ウラン、トリウム等原子核分裂の過程において高エネルギーを放出する物質(核燃料物質)を燃料として使用する装置とされている。

同法の精神に則り、原子炉等による災害を防止するための「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律(原子炉等規制法)」と、放射性同位元素等による放射線障害を防止するための放射性同位元素等の規制に関する法律(RI法)が制定されている。

原子力規制委員会設置法に基づき、「原子力利用における安全の確保に関すること」については、原子力規制委員会の所掌事務である。(原子炉等規制法、RI法等に基づき、原子力規制委員会が規制を実施。)

国内の重水素(DD)運転を行う装置(QSTのJT-60SA、NIFSのLHD)については、RI法に基づく放射線発生装置として規制されている。一方、重水素-三重水素(DT)運転を行う装置については規制対象がまだ存在していないため、規制基準がない。なお、LHD(大型ヘリカル装置)については、重水素運転の終了に伴い、2023年、RI法に基づく重水素(DD)運転を行う装置としての規制から除外された他、放射性同位元素である三重水素(T)の取扱いや、中性子線等の放射線による放射性汚染物の廃棄その他の取扱いは、RI法に基づく。

3. フュージョンエネルギーをめぐる海外の状況

フュージョンエネルギーを巡っては、各国の動きが活発化している。2023年10月には、参加政府間の革新的な規制の実践に関する協力を促進することを目的とした政府間規制協力ネットワークである Agile Nations Fusion Energy ワーキンググループが、フュージョンエネルギーの規制枠組み構築に関する共同勧告を行った。同ワーキンググループの構成は、メンバー国が英国、日本、カナダ、オブザーバー国がシンガポール、バーレーンである。フュージョンエネルギー施設に関する規制枠組みをどのように構築するかについて、5つの勧告と、それを裏付ける2つのケーススタディをまとめた。

表. 5つの勧告

1. フュージョンエネルギーが気候変動とエネルギー安全保障という世界的な課題に対して重要な貢献ができることを認識すること。
2. フュージョンエネルギー技術とは無関係に、フュージョンエネルギー施設に適用される規制の枠組みについて、すべての国が明確化に向けた取組を開始すること。
3. フュージョンエネルギーの規制に対する調和されたアプローチが、複数の国で採用されることの利点を各国が認識すること。

4. 透明性を保ち、イノベーションを促進しながら、フュージョンエネルギーの危険性に見合った、人々と環境に対する適切な保護を維持するフュージョンエネルギーの規制枠組みを策定すること。
5. 防護レベルが適切であることを国民に保証することの重要性を各国が認識し、これを達成する方法を検討すること。

最近の動きとして、2024年4月には、イタリア・トリノで開催された、G7 気候・エネルギー・環境大臣会合の成果文書において、フュージョンエネルギーに関する記載が盛り込まれ、将来的に気候変動とエネルギー安全保障上の課題に対して永続的な解決策を提供する可能性があることを認識し、開発と実証に向けた国際協調を促進することや、研究開発協力を強化する G7 作業部会を設立するとともに、規制に対する一貫したアプローチを推進するための情報交換を実施していくことが謳われた。

4. TF における検討の現状と今後

日本国内に目を向けると、TF が 2024 年度より、安全規制の検討の前提となり得る「安全確保の基本的な考え方」の検討を開始し、設備・装置の安全規制の検討に向けて、その前提となりうる、「安全確保の基本的な考え方」の策定を目指している。その方針は、フュージョンインダストリーの育成、原型炉開発の促進も念頭においた安全確保の基本的な考え方を産業化に乗り遅れないように検討することにある。TF では、国内、海外(米国・英国等)の状況や、設備・装置の特徴について当事者に直接ヒアリングし、変化する情勢や課題に関する的確な情報把握に努めると共に、検討方針に関する議論を重ねてきた。

2024年8月現時点における最近の議論は、TF の検討対象に関わるもので、これまでの4か月弱の検討や情勢変化を踏まえ案をまとめた。

- 将来想定される、フュージョンの様々な炉型、出力、放射性物質のインベントリ、使用燃料等にも対応できるよう、「技術中立的」な安全確保フレームワークの在り方を検討していく。
- その際は、米国・英国等の方針も参考に、想定されるハザードや、設計の熟度に応じて、段階的に規制の在り方を検討していくアプローチの採用可否についても議論する。

TF では、より具体的なイメージを持った上で議論を行うため、今後、現在検討されている原型炉や国内スタートアップが構想する核融合装置についてもヒアリングを行っていく予定である。さらに、今後の検討は、日本原子力学会に発足した研究専門委員会「核融合炉の潜在的リスクとその評価手法」をはじめ、各学会との連携を図りながら効果的な検討を進める。

6. おわりに

今後のフュージョンエネルギー安全確保に関する検討は、持続可能なエネルギー供給と気候変動への対応という観点から極めて重要である。本稿で示した TF の活動や国際的な動向は、規制枠組みの策定において大きな指針となる。日本としても、これらの議論を踏まえつつ、安全性の確保と技術革新の促進を検討し、国際的な連携を強化しながら、フュージョンエネルギーの実用化に向けた取り組みを進める必要がある。今後も、TF として多角的な視点からの検討を継続し、フュージョンエネルギーの安全かつ効率的な利用に向けて、実践的な規制の在り方を追求していく所存である。

*Hiroko Kondo¹

¹Matrix-K.

核融合工学部会セッション

核融合炉の潜在的リスク

Potential risks of fusion reactors

(2) 原子力学会での研究専門委員会の状況

(2) Status of Research Advisory Committee in AESJ

*林 巧¹¹量子科学技術研究開発機構 六ヶ所フュージョンエネルギー研究所

1. 委員会設立の趣旨（背景と目的）

日本政府において、内閣府統合イノベーション戦略推進会議が「フュージョンエネルギー・イノベーション戦略（令和5年4月14日）」を決定し、フュージョンエネルギーを新たな産業として捉えるとともに、実用化に向けて加速する方針が提示されている。この戦略の中で社会実装に向けた研究開発や産業育成の考え方が示されており、「内閣府に技術者や規制の専門家、一般市民を構成員とするタスクフォースを設置し、関係省庁の協力を得ながら、フュージョンインダストリーの育成、原型炉開発の促進も念頭においた安全確保の基本的考え方を産業化に乗り遅れないように検討する。なお、その際に、核融合は核分裂とは原理が異なることから、規制を検討する体制も含めて議論を行う」とされている。

本研究専門委員会では、政府における上記の議論と並行し、原子力研究者の立場から、核融合炉の潜在的リスクを、既存の核融合原型炉概念や既設の核融合関連施設を例にして再確認するとともに、社会に受容される核融合炉の「安全や安心」のあり方、その評価手法の考え方などについて議論し、専門家の知見を集約してエネルギー利用としての核融合の安全指針を示すことを目的とする。

2. 研究活動項目

2-1. 委員構成

日本原子力学会の核融合工学部会を中心として、原子力安全部会や社会環境部会からも参画いただき、大学、研究機関、産業界など幅広い層の方々のご意見をいただけるよう配慮した委員構成（26名）とした。

2-2. スケジュール

2024年度中に、4回程度の委員会(Web会合)を設定し、各専門家から以下の情報を提供いただき議論する。2025年度にも4回程度のWeb会合を開催し、可能な限り諸外国の検討状況も反映して報告書（中間及び最終報告）を作成し、ホームページで公開するほか、年会・大会における企画セッション等で報告する。

2-3. 研究内容

以下の項目について、具体的確認、議論を行い、上記の目的に沿った報告書をまとめる。

- ① 既設の核融合研究関連施設等（JT-60, TPL, ITER）における潜在的リスクとその対応
- ② 日本の核融合原型炉の基本概念（JA DEMO）と潜在的リスク及びその対応
- ③ 諸外国（特に英国、米国など）での検討例
- ④ 原子炉施設と核融合の安全確保策の比較
- ⑤ 大型施設における、安全・安心のあり方と社会的受容性

3. これまでの検討結果

本委員会はR6/6/1付で設立され、既に2回のWeb会合（6/25, 7/19）を開催し、委員会の趣旨及び核融合炉（磁場閉じ込め方式）の概念を確認して上記の①について議論した。総じて、過去の議論を参考に核融合炉の安全上の特徴を考慮しつつも、現状の原型炉の概念設計における具体的なリスクの違いを確認していくことが重要との意見が出されている。なお、8/19には②の議論を予定しており、当日は合わせて報告する。

*Takumi Hayashi¹

¹QST, Rokkasho Institute for Fusion Energy

核融合工学部会セッション

核融合炉の潜在的リスク

Potential risks of fusion reactors

(3) 磁場閉じ込め核融合施設のリスクと対応検討

(3) Risks and Countermeasures for Magnetic Field Confinement Fusion Facilities

*染谷 洋二¹¹六ヶ所フュージョンエネルギー研究所

原型炉設計合同特別チームの安全設計グループでは、トカマク型磁場閉じ込め核融合原型炉プラント（JA DEMO）の安全確保方針の策定に向けて、主にソースタームの同定、重要な想定起因事象に対する事故防止・緩和方策の構築、並びに安全要件を策定すると共に原型炉で発生する放射化物の埋設区分の同定と廃止措置計画の策定を進めている。講演では JA DEMO の安全上のリスクと対策案について報告する。

JA DEMO における主なソースタームは燃料である三重水素、プラズマ対向壁の材料であるタングステンの損耗により発生する放射化ダスト、冷却配管内での腐食によって発生する放射性腐食生成物（ACP）、及びダイバータターゲット部での熱負荷低減のために注入する不純物ガス（アルゴン）の放射化ガスである。原型炉の安全確保はこれら放射性物質を閉じ込めることに尽き、負圧管理した一次障壁である真空容器や二次障壁である建屋によって閉じ込める方針である。

次に JA DEMO の想定起因事象の同定に向けて、実験炉イーターや設置される増殖ブランケットを対象に機能故障モード影響解析（FFMEA）を実施し、プラズマ制御異常による出力過大やポンプ・電源異常による冷却能力の低下/喪失などの 17 つのシステム異常やブランケットやダイバータなどの冷却配管の大規模破断などの想定される 5 つの最大事象が抽出された。原型炉では加圧水型軽水炉（PWR）と同等の運転条件（水温：343℃、圧力：15.5 MPa）で発電実証することを想定しており、これら冷却配管が破断した際に障壁を加圧することが障壁破損の最大の脅威である。これより、抽出された起因事象の大部分が冷却配管破断事象（LOCA）時の加圧影響に帰着する。従って、原型炉の安全設計では LOCA 時に各障壁を守るために圧力緩衝システムを備えている。さらに、JA DEMO を対象とした安全解析から得られた安全上の特徴に基づき、抽出された最大事象の備えとして、保護リミターの導入、冷却系統内への逆止弁の設置、及び配管破断した際に発生する大量の蒸気の移行経路を工夫することにより、環境への漏洩を大幅に抑えられる見通しである。

最後に講演当日には、具体的な安全解析の結果を通して、JA DEMO の安全上の特徴を整理すると共に想定される起因事象に対して対策を進めた安全システムについて報告する。

*SOMEYA Youji¹

¹Rokkasho Institute for Fusion Energy

核融合工学部会セッション

核融合炉の潜在的リスク

Potential risks of fusion reactors

(4) 施設外での RI の環境動態

(4) Environmental behavior of radionuclides originating from fusion facilities in the field

*横山 須美¹¹長崎大学

核融合発電は、二酸化炭素排出量を低減できる点で、環境への負荷が比較的小さく、実現すれば地球温暖化へ貢献も大きいものと考えられる。また、長半減期の放射性同位元素が生成されないことから廃棄物管理の面でも原子力発電よりも安全性が高いといえる。しかしながら、燃料として水素の放射線同位元素であるトリチウム（三重水素）を使用する。また、核融合反応で生成される中性子による構造体の放射化等により⁴¹Ar や¹³N 等の短半減期の放射性同位元素の生成は避けられない。これらの環境放出をできるだけ低減するため、放出低減と閉じ込め対策が必要である。中でも、燃料に使用されるトリチウム量は、これまで研究等で利用されてきたレベルを大きく上回ることが予想される。トリチウムの放射性同位元素としての特徴は、β線放出核種であること、その最大エネルギーは 18.6 keV であること、そして物理学的半減期が 12.3 年と比較的長いことである。エネルギーが低いβ線放出核種であることから、体内での飛程は平均 0.6 μm、最大でも 6 μm である。このため、他の核種を同量摂取した場合に比べ線量は低い。たとえ環境中に放出された場合でも環境やヒトへの影響は小さいと考えられるが、核融合発電の早期実現に向けて、社会に受容してもらえようエネルギー源となるよう、施設から環境へ放出される主となる放射性同位元素であるトリチウムの環境及びヒトへの影響評価をあらかじめ行っておくことが重要であると考えられる。

燃料のトリチウムはガス状のものが利用されると考えられることから、環境に放出される際の化学形としては、主に、ガス状（HT）またはこれが酸化した水（HTO）であろう。トリチウムは、同量摂取しても化学形により線量が大きく異なる。化学形が HTO の場合、HT に比べ線量係数（1Bq 摂取したときの線量 Sv）が 10,000 倍も高い。その環境挙動も特徴的である。環境中（大気中）に放出されたトリチウムの化学形が HT の場合、ヒトが直接それを経口または吸入摂取した場合は、HTO を摂取した場合に比べて線量は著しく低い。しかし、環境中（大気中）に放出された HT は土壌表面に接触（沈着）すると、土壌表面上に存在する細菌により、直ちに酸化されて HTO となる。このため、その後、土壌下層への移行、地下水や河川への流出、動植物への移行、そして大気への再放出は HTO として評価する必要がある。また、植物へ移行した場合、二酸化炭素と水（HTO）から光エネルギーを用いて有機物（有機結合型トリチウム、OBT）を合成する。この OBT は水と交換しやすいもの（交換型 OBT）のほか、一部は、セルロースのような交換が起こりにくい成分（非交換型 OBT）となる。この OBT の線量係数は、HTO の約 2 倍となっており、HTO として摂取した場合よりさらに線量への寄与が高くなる。環境やヒトへの影響を過大評価しすぎないためには、施設から放出されたトリチウムの化学形、評価地点の大気での拡散状態（地形や気象条件）、土壌表面での酸化のしやすさや土壌内での移行、そして大気への再放出割合（土壌の種類）、植物内での移行や OBT としての蓄積（植生）等を十分に把握しておく必要がある。

本発表では、主にこのようなトリチウムの環境挙動のほか、施設内で生成される主な放射性同位元素の特徴についても、紹介したい。

*Sumi Yokoyama¹¹Nagasaki Univ.

核融合工学部会セッション

核融合炉の潜在的リスク

Potential risks of fusion reactors

(3) レーザー核融合施設での潜在的リスク

(3) Potential risks on laser fusion facilities

*重森 啓介

大阪大学

レーザー核融合炉を中心としたレーザー核融合施設においては、(方式によらない)核融合炉に共通の存在するリスク、およびレーザー方式における特有のリスクが存在し、それぞれを定量的に評価する必要がある。

DT反応ベースとしたレーザー核融合炉は、他の方式と同様にトリチウムを軸とした安全性の確保が重要であり、その安全対策を逸脱した事象が潜在的なリスクとなる。レーザー核融合炉はパルス運転炉であり、1回(1ショット)あたりに消費する燃料ペレット中は μg オーダーであるものの、冷却系やトリチウム回収系の炉システム内、そして貯蔵燃料ペレットを含めたインベントリーは相当量となる。例えばレーザー核融合炉「光陽」の設計例では、トリチウム増殖比が1.1、燃焼率が30%の場合、炉システム全体でのトリチウムインベントリーは0.24 kgである。炉システムのインベントリーを減らすためには、核融合燃焼率の高効率化、トリチウム回収から燃料ペレットの生成までの工程・時間の短縮などが挙げられ、これらの項目を解決することが安全性向上に繋がる。

レーザー核融合炉では、磁場核融合とは異なりブランケット設計に磁場の影響を考慮する必要があることから、液体(金属)を第一壁とする設計が多く提案されている。プラズマと接する面に液体金属流をブランケットと冷却材の役割を持たせ、中性子などによる照射損傷を提言する効果がある。一方で高温の液体金属を自由表面に曝すことになることから、その取り扱いには十分な注意を要する。特にレーザー核融合炉を水素製造に活用する場合、IS法などの熱化学法を想定すると冷却系の温度を 850°C 以上に設定する必要がある。この条件はこれまでの核融合炉設計では考慮されていなかった領域であり、最適な材料設計について高温ガス炉の知見などを参考にすることが必要である。さらに冷却系に含まれるトリチウムの拡散係数は温度の関数で増大するため、トリチウムに関する安全確保という意味でも重要な課題である。

更に磁場核融合炉との違いとして、核融合反応がパルスの起こることから、放射線の遮蔽という観点でも異なる考え方で設計を行う必要がある。点滴的にはナノ秒以下の時間スケールで 10^{19} の反応が点光源的に集中して発生するため、これを踏まえた空間・時間的遮蔽方法を実施する必要がある。過去のレーザー核融合炉設計においても、これらを考慮した最終光学系の配置や炉本体の遮蔽などが検討されてきたが、装置の保護や長寿命化、環境に対する影響をより詳細に評価した設計が必要となる。

上記に挙げた例は既にリスクとして認識されている項目であり、「潜在的」リスクという意味では検討不足な面が多い。レーザー核融合炉はエネルギー変換システムとして未だ実機を想定したスケールダウンモデルを製作した実績が無いため、設計段階における想定外のリスクを予見することが困難である。今後、フュージョンエネルギーの実用化という観点では、発電実証という大きなマイルストーンと同時並行して安全性に関する技術的検討・解決策の提示することが求められる。

*Keisuke Shigemori¹

¹Osaka Univ.

企画セッション | 部会・連絡会セッション：核融合工学部会

2024年9月12日(木) 13:00 ~ 14:30 B会場(講義棟A棟1F A102)

[2B_PL] 核融合炉の潜在的リスク

座長:谷川 博康(QST)

[2B_PL06] 総合討論

日本政府は内閣府統合イノベーション戦略会議にて「フュージョンエネルギー・イノベーション戦略」を決定し、フュージョンエネルギー実用化に向けた加速方針を示した。これに基づき、内閣府は技術者や規制の専門家、一般市民から成るタスクフォースを設置し、フュージョンインダストリーの育成や原型炉開発の促進も念頭においた安全確保の基本的考え方の検討を開始した。並行して原子力学会ではエネルギー利用としての核融合の安全指針を示すことを目的として「核融合炉の潜在的リスクとその評価手法」研究専門委員会を設立し、議論を開始した。これらの議論をコミュニティに広く紹介し、会員から意見を募ることで、今後の議論の参考とする。