

# フュージョンエネルギーの実現に向けた安全確保の基本的な考え方 検討タスクフォース(第5回)議事要旨

I. 日時 : 令和6年9月19日(木)10:30~12:00

II. 場所 : オンライン会議

III. 出席者 : (敬称略)

## タスクフォース構成員

大野 哲靖	名古屋大学大学院 工学研究科電気工学専攻 教授
奥本 素子	北海道大学 科学技術コミュニケーション教育研究部門 准教授
近藤 寛子(主査)	合同会社マトリクスK 代表
田内 広	茨城大学 理工学研究科(理学野)生物科学領域 教授
寺井 隆幸(主査代理)	東京大学 名誉教授/エネルギー総合工学研究所 理事長
富岡 義博	電気事業連合会 理事
中村 博文	量子科学技術研究開発機構 六ヶ所フュージョン エネルギー研究所核融合炉システム研究開発部 次長
波多野雄治	東北大学大学院工学研究科量子エネルギー工学専攻 教授
福家 賢	東芝エネルギーシステムズ株式会社 パワーシステム企画部 部長代理
横山 須美	長崎大学 原爆後障害医療研究所 教授

## 外部有識者

飯塚 清太	Blue Laser Fusion合同会社 VPO
野尻 悠太	株式会社LINEAイノベーション 代表取締役CEO
松尾 一輝	株式会社EX-Fusion 共同創設者兼CEO

## 省庁関係者

川上 大輔	内閣府 科学技術・イノベーション推進事務局 審議官
馬場 大輔	内閣府 科学技術・イノベーション推進事務局 参事官(統合戦略担当)
石川 勝利	外務省 軍縮不拡散・科学部 国際科学協力室長
澤村 新之介	資源エネルギー庁 電力・ガス事業部原子力政策課 原子力基盤室長補佐(総括)
多田 克行	資源エネルギー庁 電力・ガス事業部原子力政策課 原子力基盤室長
湯本 正樹	経済産業省イノベーション・環境局 イノベーション政策課 研究開発専門職
永森 一暢	環境省 大臣官房総合政策課環境研究技術室 室長補佐
上谷 聡太	原子力規制庁 放射線規制部門 総括補佐

#### IV. 議事

##### 1. 開会

##### 2. 議事

(1) スタートアップが構想する核融合装置について

- ① Blue Laser Fusion 合同会社
- ② 株式会社LINEA イノベーション
- ③ 株式会社EX-Fusion

(2) その他

##### 3. 閉会

#### V. 配布資料

資料1 Blue Laser Fusion 合同会社 提出資料

資料2 LINEA イノベーション 提出資料

資料3 EX-Fusion 提出資料

#### VI. 議事概要

(1) スタートアップが構想する核融合装置について

- ① Blue Laser Fusion 合同会社代表の中村氏及びVPOの飯塚氏より資料1に基づき説明

<主な質疑>

##### ○波多野委員

非常に特徴的な燃料を使用して効率を上げるということだったが、フェーズ2とフェーズ3でのトリチウムのサイトインベントリは、どの程度と評価しているか。

##### ●中村氏 (Blue Laser Fusion)

はっきりとした予定が決まっておらず、炉の設計もできていないため、今のところ具体的な数値はない。ただ、フェーズ2あるいはフェーズ3において、D-Tを使用した実験をしたいと思う。その後、点火温度とゲインを確認してから、中性子を防ぐ新しいターゲットを実装したい。

このため、まずブランケット等を使ってD-T反応から生じる中性子を防ぐ装置を実装したいと思う。

##### ○大野委員

エネルギーダイアグラムにおいて、新しい燃料を使うとエネルギーコンバージョンが50%程度になるということだが、ブランケットを考えるか考えないかによって、またどこで安全のバウンダリを考えるかによってエネルギーコンバージョンが変わってくると思うが、全く違う概念がここに入ってくるのか。

右側のHybrid Energy Converter50%については、レーザーのことを言っているのか。

##### ○中村氏 (Blue Laser Fusion)

これは、プラズマのエネルギーを電気に変換する効率である。変換方法としてインダイレクトとダイレクトの両方を利用している。一つは、従来からある方法であるインダイレクトであり、熱エネルギーに変換して水蒸気でタービンを回転させる方法である。もう一つは、ダイレクトコンバージョンであり、荷電粒子のエネルギーを電磁誘導の原理を用いて電気に変換する方法である。従来のインダイレクトは40%くらいであり、原子力発電所で40%くらいである。これにダイレクトの方法を使い、更に10%くらい上げて50%くらいと期待している。

##### ○大野委員

インダイレクトという意味は、ブランケットを使い、中性子からエネルギーを得るということか。それプラス直接(ダイレクト)発電が加わってくるということか。

●中村氏 (Blue Laser Fusion)

そこははっきりとは決まっていない。

最終的なターゲットは、なるべく中性子のエネルギーを減らす方向で進める。そのため、もし中性子をかなり減らすことができれば、従来のブランケットは要らなくなり、単純なウォータージャケットくらいとなる。理想ではあるが、中性子のエネルギーがどれだけ減らせるかによるので、そこまでできるか分からない。

もちろん減らせない場合、ブランケットを使うが、最初はD-Tで試験して、それから中性子のエネルギーをどこまで減らせるかを決定する。

○中村委員

最初は、D-Tを使って中性子が出る。発展型では、D-Tのほかに燃料を使って中性子を減らすということだが、燃料キャプセルの中に別の元素を入れて、ほかの核反応を起こして中性子を減らすのか。そうであれば、どのような核反応を期待しているのか、支障がなければ教えていただきたい。

●中村氏 (Blue Laser Fusion)

多層構造を使ったターゲットにするという方法である。基本的にはD-Tであるが、中性子のエネルギーを減らすということである。

○中村委員

キャプセルの中で中性子のエネルギーを減らしてということか。

●中村氏 (Blue Laser Fusion)

ターゲットの構造が変わるということである。第1段階は純粋なD-Tのターゲットである。それから、中性子を減らすような新しい構造のターゲットを使う。

○寺井主査代理

トリチウムのインベントリについてまだ分からないということだが、製造施設やターゲットを保管する場所は結構なインベントリがあると思うがいかがか。

また、放射性的ダストがどれくらい出るのかについても、まだ評価はできないという理解でよいか。

●中村氏 (Blue Laser Fusion)

ターゲットをどういう構造にするか、最終的には中性子のエネルギーを減らすような新しい構造のターゲットを使ってどうなるかは、まだ分からない。

純粋なD-Tを使えば、ブランケットを使ってトリチウムを再生してブリーディングして、それをまたフィードバックしてトリチウムを使えるという方法を皆さんは考えていると思うが、例えば純粋に中性子のエネルギーを減らすことができれば、自社の場合はトリチウムを外部のブリーディングシステムを使う方向になるため、ブランケットでトリチウムを再生して使う方法ではなくなる。今のところ、方向性がいろいろ変わるので、インベントリやダスト量についてははっきり言えない状況である。

○寺井主査代理

放射性物質の敷地境界濃度などについては、多分アメリカでも日本の考え方と余り変わらないと思うが、認識されているという理解でよいか。

●中村氏 (Blue Laser Fusion)

もちろんである。中性子によりリアクターが多少放射化され、放射化された炉壁をどうすればよいかについては認識している。

② 株式会社LINEA イノベーション代表取締役CEOの野尻氏より資料2に基づき説明

<主な質疑>

○大野委員

200メガワットの核融合出力は、どのくらいのQ値を想定しているのか。また、加熱入力はどのくらいとなるのか。

●野尻氏

Q値の定義として、いわゆる熱的な核融合と比較すると、ビーム駆動は若干考え方が違う可能性がある。ただ、ビームについては、当然ターゲットプラズマに対して入力する必要があり、それらの数値はまだ確定していないが、恐らく2桁メガワットくらいのオーダーになるのではないかと考えている。

○大野委員

定常ではなくてパルスということだが、これはFRCを作って、その後NBIで定常維持をするということは想定されていないのか。

●野尻氏

まず、試験的な運用をする上ではパルス運転にせざるを得ない。コンデンサ等に電力をためて、最初の始動のエネルギーを得る必要がある。それを定常運転するためには発電を行い、その発電を利用するというような一連のフローが必要になってくる。そこまでは、原型炉の段階ではおそらく実現できないということなので、あくまで別に蓄えたエネルギーを利用してパルスの的に起こすことになる。このため、蓄えたエネルギーによってパルス運転の時間が規定されてしまうという想定で考えている。

○大野委員

D-Tではないので、中性子やトリチウムの問題はないということは分かるが、この装置特有のハザードとして、例えば180keVくらいのNBIを使って投入する場合に付随するような、想定しなければならないハザードはあるのか。

●野尻氏

もしあるとすれば、例えばNBI等により、いわゆる硬X線が発生する可能性はあるので、その遮蔽については当然考慮する必要があると考えている。

○中村委員

アルファ粒子から電気を取り出すのは、直接発電のような形なのか。そのときの効率ほどの程度か。

●野尻氏

まず、アルファ粒子については、いわゆる直接エネルギー変換ということを想定している。

この直接エネルギー変換は今後の開発課題なので、具体的なスペックは回答し難いが、過去に行われている電力変換に関する研究での効率では、例えば70%程度という数値が公表されたと理解しているので、少なくとも70~80%程度の変換効率は目指したいと考えている。

○中村委員

国内で加速器を建設しようと考えていると思うが、今のRI規制法の枠組みの中で十分に安全が確保できると考えられるか、それともプラスアルファが必要だというふうにか考えるか、意見を伺いたい。

●野尻氏

もう少し詳細な検討が必要だとは思いますが、この装置であればRI法の範囲内で一定程度の運用が可能ではないのかなと考えている部分はある。

○波多野委員

このタイプの炉も含めて、フュージョン炉というものの安全をどう考えるかということはこのタスクフォースで議論しなければならないので、D-T炉と比べた場合の特徴や、運用が困難となる規制の例、規制に対する希望や提案があれば意見を頂きたい。

●野尻氏

弊社からの要望としては、ビームはD-Tとは少しアプローチが違うし、ハザードの内容や、核融合反応における取扱量も異なるので、規制の内容については個別の利用反応等を反映させた内容、例えば区分等を整理いただくと非常に有り難いと考えている。

○寺井主査代理

パルス運転を原型炉、実証炉では連続運転という説明があったと思う。発電し、それを今度ビームの方に導入するため、最初はパルス運転という説明だったと思うが、プラズマの閉じ込め、それから加速器の開発等について、このパルス運転と連続運転の違いはないのか。

●野尻氏

1つ大きな要素として挙げるのであれば、連続運転の課題としては、NBIは当然運転時間中連続的に照射する必要があるので、除熱の問題があると思う。冷却の問題はNBIでもあるし、核融合プラズマから放出される熱の問題もある。さらには、直接エネルギー変換も先に説明したとおり変換効率が70%~80%だとすると残りは熱になるので、その除熱という問題が連続運転における課題になってくると考えている。

○寺井主査代理

除熱システムは適切なものを作られると思うが、例えばチェンバーの破損については安全上極めて重要な事象につながると思うが、今後の検討課題ということではよろしいか。

●野尻氏

今後検討を進める予定である。ポイントの1つとして、中性子が発生しないことから、炉壁材料の選定については、それを考慮せずにチェンバー設計ができるという意味では、設計の自由度が上がるということだと思う。

○寺井主査代理

ビームがずれることによって炉壁に直接当たる問題等も検討すべき内容かと思うので、引き続き検討いただきたい。

○寺井主査代理

貴社で考えている実験場所はどこか。または、例えば協業相手や連携機関にて装置の設置を考えているということ等でも構わないので、教えていただきたい。

●野尻氏

今の段階では、具体的な原型炉の設置場所は決まっていないので、残念ながら回答できる状態ではない。我々としても、立地は重要な問題かなとは思っている。実態としては、中性子や放射性物質というようなハザードを余り考慮する必要がないので、立地の自由度はあると思っているが、核融合炉に対する見られ方を考えつつ立地を検討していきたいと思う。可能であれば研究者の活動や会社の運用を考えて、立地の制約はなるべく少ない方がいいと思う。今、そのところは検討を進めている段階である。

③ 株式会社EX-Fusion共同創設者兼CEOの松尾氏より資料3に基づき説明

<主な質疑>

○大野委員

最初のD-Tの前は重水素ターゲットで実験を行うということでしょうか。

●松尾氏

そのとおり。我々は重水素のターゲットの開発も行っており、発電実証の手前の段階、若しくは発電実証炉の初期の段階はD-D反応をするつもりである。

○大野委員

今はD-Dということだが、2024年での段階ではいかがか。

●松尾氏

現状は、レーザーのスペックとして中性子を出せる。いわゆるD-Dを打てば中性子を出せるが、今はそれをやっていない。やっていない理由は、中小機構のインキュベーション施設のハイキューブという場所であり自社施設ではないということで、中小機構にそういうのを出してもいいのかを尋ねたところ、渋い反応ではあったので、我々としてはここでは基本的には出さない方がいいと思っている。

○大野委員

2030年の発電実証炉では、どのくらいの核融合出力を想定されているのか。

●松尾氏

核融合の出力という意味で言うと、中性子数で言うと $10^{13}$ 個、 $\sim 10^{14}$ 個/秒くらいなので、エネルギーにすると10ジュールとか、それほど大規模な出力ではないと思う。

○大野委員

ということは、発電実証と言いながら一応D-T核融合を検証するというイメージか。

●松尾氏

そのとおり。レーザー核融合はコンパクトに実証ができるということがいいところである。もちろん将来的にはレーザーの本数を増やし中性子数も指数関数的に増えて、もっと大規模なものということもできるが、時間と費用の制約で、ミニマムでD-T反応を起こしてこれだけの中性子を出すということが、2030年に我々ができる規模感かなと想定している。

○大野委員

NIFが非常に話題になったQ1を超えるとか、そういう話ではないということか。

●松尾氏

Q1以上というところは狙ってはない。

○大野委員

安全規制とは関係ないかもしれないけれど、レーザー開発も重要であり、そのエネルギー変換効率が全体のパフォーマンスを決めると思うが、それもこの中でやるのか。

●松尾氏

もちろん並行してレーザーの開発も進めており、正直に言うと、多分発電実証クラスであれば現在の技術でできると思う。単純にお金を掛ければこれくらいのは作れると思う。一方で商業炉レベルでは、当然レーザー自体の費用を一定規模に抑えないといけないので、そのための開発というのは別途並行して

行っていこうと思う。

○中村委員

D-Tターゲットは氷のD-Tを使われるということによろしいか。阪大のように高分子ポリマーの中にガスを入れるのではない、ということによろしいか。

●松尾氏

どちらも検討している。セルにD-Tのガスを封入して打つというパターンもある。現状、一番可能性として大きいのは、この発電実証炉のクラスであればラートというターゲットで、これはガラスの薄いセルの中にD-Tガスを封入したものである。これであれば爆縮だけ比較的多くの中性子を出すことができるので、我々としてはラートターゲットというものを使っていこうとしている。

○中村委員

D-Tターゲットを使う場合、発電実証炉のときには、大体どれくらいの量のトリチウムを使われる予定か。

●松尾氏

トリチウムの量自体はごく微量でもいいと思っている。1個の燃料ターゲットが直径3ミリのターゲットなので、正確な計算はないが、グラムオーダーであり、コントロールすることはできると思う。基本的にはD-Dで実験をずっと行っており、例えばたまに100ショットのうち1ショットだけD-Tをやるとか、それくらいの実証を今考えているところである。

○中村委員

先ほど説明されたラートのターゲットは、どこか別の工場で作り、この発電実証に持ち込んで据え付けて試験をやるというイメージでよいか。また、サイトの中でターゲットを作るということではないか。

●松尾氏

今、2つ検討している。設備自体は正直そこまで大きくなく、いわゆるターゲットの設備だけ取ると大きくはない。施設の中にターゲットラボもあり、常にターゲットを供給し続けられるという状況が一番良いが、現状は、民間企業でトリチウムを扱うこと自体ができないと思うので、そういう意味では例えば大学と共同研究して、大学でトリチウムを使えるところに作ってもらい、それを運んで持ち込む。ただ、結局トリチウムを運ぶという行為も結構大変だと思うので、それは規制によるかと思う。結局、一番良い状態というのは、施設の中にターゲットラボがあるという状態である。

○寺井主査代理

安全とは関係ないかもしれないが、2030年に発電実証炉ということだが、先ほどの話ではD-DがメインでたまにD-Tということだった。この発電実証炉は発電を実際に起こすという理解でよろしいか。

●松尾氏

熱電変換の規模感だと100ワット程度のレベルだが、とにかく中性子から熱に変換したもので発電を実証してみようという弊社の取組である。

レーザー核融合は、レーザーの本数を変えれば、ある程度はスケールラブルに中性子数を変えることができるので、中性子の量自体というよりは技術的に連続で核融合反応を起こし続けることができるのかというところにフォーカスしたような検証炉になっている。

○寺井主査代理

これは、ブランケットを使った発電というよりは、むしろ熱電変換、とにかく電気をレーザー核融合で作るとい、それが実証できるという、そういう理解だと思ってよろしいか。

●松尾氏

もちろんブランケットも挿入するが、基本的には御理解のとおりである。

---

○近藤主査

少し委員の皆さんと意見交換したい。これまでにQSTを除く5つのプレゼンテーションがあった。それを踏まえて、印象的だったことや、これからもう少しこの辺りを考えた方が良いと思われることなど、感想を伺いたい。

○奥本委員

どういう形で発言していいのかと迷っている段階である。

テクノロジーアセスメントの考え方をい用いると、テクノロジーとしての確立が不確かな段階でどこまでテクノロジーを評価するのか、例えば今回の最後の説明であった中性子量の部分だけを規制するのではなく、様々な事故を想定しながらテクノロジー評価するというのは、ルール化が必要であり、今後このような未発達のテクノロジーに対して、どのように評価するのかという観点がぶれてしまわないかという懸念がある。

いろいろな核融合の出力方式がありましたが、どんな出力方式であっても、どんなメカニズムであっても、安全基準を設けるといのはどのような評価デザインというのがあり得るのかという部分を話し合っていかなければいけないと思った。

○田内委員

今日は技術的なことが多く、聞くチャンスがなかったが、今日のLINEAイノベーションとEX-Fusionからは、現在の法体系に関する御意見を頂いた。そのほかの事業者からも現状の例えば炉規法とかRI規制法では困るようなことがあるのかを是非伺いたいと思っている。

もう一つ、例えばブランケットの冷却にリチウム鉛合金を使用するような方式が多いのかと思うが、例えばリチウムが漏れると非常に危険であるということは当然なので、その辺りの規制をどうするかというのは今後の議論になると感じている。

○富岡委員

5施設の説明を聞いて、いろいろな種類の施設があると思った。安全確保の考え方、つまり、安全に対する要求を考える際にはリスク評価が大切であり、施設によりリスクの大きそうなもの、小さそうなものがあるように思う。いくつか出ていた質問にはいくつかのポイントがあり、トリチウムのインベントリや事故時挙動は重要なポイントだと思った。

設計者においては、段階に応じてだと思うが、安全確保の考え方が必ずしも煮詰まっていないようなところもある。このタスクフォースの場においては、規制当局のような審査をやるわけではないので、必ずしも完全に判断するだけの情報を十分に揃えることも難しいので、リスクに対して断定的に今の段階でコメントするのは、立場もあるかもしれないが、これだけの情報と時間では検証するのは難しいと感じている。

また、これらの施設が例えば既存の原子炉以外の核燃料物質であるとか、あるいは普通のRIを使う施設と比べてインベントリや事故時挙動みたいな観点で何か同等の施設があると参考になると感じた。日本には、例えばJAEAには様々な放射性物質を扱う設備があると思うので、インベントリや事故時挙動という意味で同等のリスクのものが何かあれば参考になるのではないかなと思う。

○横山委員

今の法体系を何と比較するということを考えたとき、大型加速器というのが一つ参考になると思った。

その安全の考え方を一つの目安にして、また、今日の説明ではトリチウムが発生しないものもあったが、プラスアルファで何を考えると非常に分かりやすくなる。J-PARCの場合は液体金属がターゲットだったりするし、水銀を使ったりするので、そのような放射性物質ではないものの取扱いも分かるのかと思った。

## ○福家委員

富岡委員の発言のとおりであると思った。

リスクは、悪いことが起こったときに人や環境にどの程度の影響が起こるのか、その甚大さによって規制するというのが国民感情であると思われ、規制により安全が確保されることで安心につながると思う。

いろいろな技術や技術的な進歩がある中で、これから一つ一つの技術に対する議論をするのは難しいと感じた次第である。本題からは外れてしまうかもしれないが、本タスクフォースの最終的なアウトプットをどうするのか、そろそろ話をフォーカスしていく段階だと感じており、事務局にはそのうち提示していただきたいと思っている。

## ●馬場参事官

まさに、これからの取りまとめに向けて、主査、主査代理と相談した上で各委員とも御相談していきたいと思っているところである。今の時点での安全確保の基本的な考え方については、このタスクフォースでまとめたものを親会議である核融合戦略有識者会議に報告し、その場で決定するという形でのクレジットになると思っている。

その過程では、パブリックコメントのようなこともしないといけないし、関係者、例えばJ-Fusion、業界団体全体、学会についても話を聞いて、その後の検討状況をインプットしてもらいたいと思っている。また、参考となるが、今週開催されていたIAEAの総会でも各国の方から核融合に対する規制についての取組、IAEA側からも日本の取組についても話を聞きたい、というような話もあった。もともと11月6日にイタリアで予定されているWorld Fusion Energy Groupをターゲットにしていたところだが、その前後でIAEAとディスカッションしてもいいのかと思っている。

最終的には、ある程度の認識を探ってきたので、骨子的を作成し、まずは骨太なところをどこまで考えるのかということと先生方と個別にディスカッションしたいと思っている。例えば、これは各スタートアップにも聞いてみたいと思うが、現状のままでいいのかよくないのか、実際どういう課題があるかは確認したいと思う。ただ、少なくとも彼らから提案があったような実証施設、設備であれば多分RI法で問題ないかとは思いますが、パイロットプラントで今回話が聞けなかった原型炉になると、RI法にプラスアルファするべきか、それをどう捉えるのかというところは、ある意味アメリカのように期限を区切った形で政府としても考えなければならぬと思う。また、新しい技術に対してどう規制していくか、テクノロジーアセスメントも含めて、国際的な協調をどうしていくのかとか、といったところも盛り込んでいくべきかと思っている。

その上で安全確保の基本的考え方としては、今後、いろいろなステークホルダーのガイドラインになるようなものを作った上で、学会においては例えばトリチウムに関する安全研究をもう少し進めるべきとか、事業者側にはこのようなことをしてくださいとか、次につながるようなものを何とか今年度中にまとめて、ある意味フォローアップのような形で、1年後程度の期限を区切ってやればよいと思っている。

## ●馬場参事官

次回以降は、原型炉のこと、学会の検討状況、業界団体としてJ-Fusion、都合がつけばIAEA等からもヒアリングしたいと思っている。先ほど福家委員から発言があったとおり、このタスクフォースの最終的なメッセージの出し方については、適時、委員の方と個別でも相談し、議論させていただきたい。

以上