

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4回)議事要旨

I. 日時 : 令和6年9月17日(火)15:00~16:30

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

遠藤 典子	早稲田大学 研究院 教授
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
根井 寿規	政策研究大学院大学 名誉教授・客員教授
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

小西 哲之	京都フュージョニアリング株式会社CEO
田口 昂哉	株式会社Helical Fusion代表取締役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 京都フュージョニアリング株式会社
 - ② 株式会社 Helical Fusion
 - (2) 原型炉における安全確保について
 - (3) その他
3. 閉会

V. 配布資料

- 資料1 京都フュージョニアリング株式会社 提出資料
- 資料2 株式会社 Helical Fusion 提出資料
- 資料3 量子科学技術研究開発機構(QST) 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 京都フュージョニアリング株式会社 CEOの小西氏より資料1に基づき説明

<主な質疑>

○福家委員

トリチウムの放出が安全上かなり重要なものであることは認識した。

4ページのリスクの低減について、施設外へのトリチウム放出の安全設計は一般産業の品質標準に則れば十分なのか。

また、8ページの社会とシビアアクシデントを結びつける避難について、通常は外部退避や屋外退避をイメージすると思うが、トリチウムということであればむしろ屋内待機という考え方もあると思うが、御意見を伺いたい。

●小西氏

例えば、高圧ガス、ボイラー、火力発電所、化学プラント等の一般産業施設は、それなりのハザードがある。例えば、爆発や火災の可能性がある有害物質を出して周辺環境を汚すということ、周辺環境に住む公衆や施設内の従事者の健康に影響を与えるおそれがあるということに対しては、十分容認できる程度に低いリスクに管理するという考え方は同じだろうということである。

特にRI施設あるいは原子力施設においては、一般産業で評価する必要がない放射性物質を中心に評価することになるが、それが全てではないということである。

核融合施設の場合には、トリチウムがソースタームとして確かに存在する。結構な量であるが、その放射性ハザードは同じ放射性物質、例えば原子力発電所にあるプルトニウムのハザードに比べて十分少ない。しかし、トリチウムは飛散性があるという特徴については考慮しなければいけない。

一方では、爆発等のおそれについても考えなければならず、これは主に電磁力や圧力を持った媒体をプラントとして使うことのリスクがあり、それがハザードに至る経路を考えなければいけない。

重大なハザードの場合は、リスクつまり確率を下げることで、端的な例で100万分の1と俗に言われる。原子力では 10^{-6} 以下の確率にすれば重大なハザードが抑えられるという考え方をすることがある。しかし、確率論的安全論を使わなくても、ハザードの量とその管理の仕方によっては決定論によって評価をすることができるだろうということがここでの考え方である。ここでは、決定論的にいかなる事象についても解析をして安全性を評価するという意味である。

次の避難について、これは放射性的のそのほかのハザードについても、まず敷地内で管理することが設置者、従事者、運営者の務めである。周辺住民への被ばくリスクは、国際的には50ミリシーベルトであるが、日本のガイドライン等ではより低い20ミリシーベルト等を定めている。例えば10ミリシーベルトでは、ど

のような事故事象を考えてもこれを超えることがないのであれば、屋内、屋外どちらの方が安全とは言い難い。

例えば、日本原子力研究所の事故事象の想定では、外に放射性物質があるから窓を閉めなさいというガイドラインもあった。最終的に気密性が保たれないような施設では、そこに居ても外気を吸う、インハレーションにおける危険性は無視できないということになる。そのため、まず避難して吸入しないようにする、あるいは外部被ばくはしないようにするということは必要だが、いかなる経路でも例えば10ミリシーベルト、あるいは5ミリシーベルトを超えないというソースタームであれば、このような経路は考えなくてもよいということになる。このため、インハレーションのリスク、接触による吸入の可能性を考えても、そのパスを考えず、周辺環境との安全性の説明としては切り離せるだろうと考えている。ここは大きな違いだと考えている。

○中村委員

説明の中で計画されているプラントの核融合出力の説明がなかったが、どのくらいの核融合出力を考えているのか。これは事実確認である。

●小西氏

核融合出力について、フュージョン・システムの持っているハザードの基になるエネルギーは、反応度事故というものが有り得るので、端的な例としては100メガワットレベルを考えている。

しかし、プラズマの性能はまだ予見することが難しく、トカマクスケーリングを使った場合はHファクターと呼ばれるプラズマの閉じ込め機能がたまたま良い状況だと出力が若干上がる。そのため、100メガワットが絶対であるということではなく、多くてこのくらいという形になる。出力の微増または変動によっても閉じ込め障壁を壊すに至らないのであれば、その数字を詳しく評価をしても意味がないということになる。つまり、100メガワット程度というのは、プラズマの閉じ込め性能によっては変わり得るような数字であると考えた方がよく、本質的なものではない。

ただし、蓄積エネルギーやストアードエナジーはジュールで数える磁場のエネルギーであり、あるいはクライオプラントの持っているエネルギー、具体的に言うと液体ヘリウムを使えばその持っている圧力もある。このようなものを含めて総合的に閉じ込め機能を喪失するに至るだけのエネルギーがどこにあるかという形で考えたい。

○田内委員

システムの構築がある程度進んでいると説明があったが、実際に100グラムのトリチウムはどのような状態で保管または使われる予定なのか。

●小西氏

いろいろな形のトリチウムがある。炉心、プラズマ内は大体1グラムに満たない。プラズマ状態及びその気化したものの状態、その周りの壁には壁に打ち込まれた形で固体中に溶解、溶け込んでいるトリチウムがかなりある。これについては炉壁の材料によってかなり違うが、基本的にはグラムレベルで抑えられるだろうと考えている。

3ページ右上のシステムは圧力の高い熱媒体を含んでいて、こちらはグラム以下である。

右下はプラズマに打ち込む部分のトリチウムであり、最終的な燃料は固体、アイスペレットという形である。それ以外は基本的にはガスとして扱っている。

循環している燃料循環系は、基本的にはガスで扱うが、一部の同位体分離では絶対温度で20度前後の液相のトリチウムがある。T2DT等々は液相である。その他、冷却水等には、濃度が相当に薄いグラム以下のトリチウムが水の中に存在している。空気中、雰囲気媒体中にあるトリチウムは、循環の総量が20グラム、固相に吸着等しているものが残りの数十グラムになると考えている。

ブランケットはプラズマの周りにありトリチウムを生成しているが、トリチウムの溶解度の少ない液体金属媒体を考えているので、大体グラムレベルである。

この他、燃料を蓄える部分は、ループの外で固相の金属水素化物のような形で閉じ込めているものが若干あるかと思う。ループの外については、未評価であり、運転計画の範疇であると考えられる。

○大野委員

中村委員の質問にあった100メガワットという核融合出力は、どのような想定か。

●小西氏

トカマクを想定したフラットトップとして、大体300秒から1,000秒の全体の放電時間の中での80%くらい、つまり100秒オーダーのエネルギーを出し得る最大のフラットトップということになる。これは14MeVの中性子の形で約80%が出てくると、残りは熱の形でダイバータ、炉壁等々に与えられるエネルギーで核融合出力の定義となっている。

○大野委員

かなり小さい想定のような気がするが、発電炉として成立するということか。

●小西氏

これは発電炉でも商業炉でもない。核融合に必要な技術要素を全て持った最小限の装置、または施設として考えている。いわゆるプラズマのQ値、ラーズQ、キャピタルQで言うと、1に対して倍半分程度のファクターであり、というのはひとえにHファクターで決まる。内壁の面積については数百平方メートルのオーダーだとすると、1MW/平方メートル以上のパワーにはならない。ブランケットの加熱、熱の取り出し、トリチウムの増殖、ダイバータにおける熱の排出、これらの基本的な核融合炉の機能的な要件は全て満たすものの、実際のトリチウム、中性子を使って試験ができる最低の大きさであり、一番早くできるものかつ我々民間企業で到達できる大きさで建設リスクの少ないものがこの辺ということになる。

したがって、エネルギー増倍率で言うと必ずしもプラスにはならないが、発電技術の実証は確実にできるというあたりを狙っているので、バーニングプラズマの実験を期待される場合には若干小さいと言われるところにはなる。

○富岡委員

ハザードについて、トリチウム100グラムが全部出たとしても避難は必要ないという、放射性物質が全量放出された際の影響を評価することは、非常に重要であると思う。

その評価を前提として、実際にはいろいろな事象を考えても全量は放出しないという評価をしていて、安全解析時には安全設備があるから全量は放出しないということであると思う。

そのため、容器や空調等の安全設備が影響を緩和するために必要であれば、その安全設備にはある程度しっかりとした要求を出す必要があり、それはリスクとの関係になるが、具体的な容器の信頼性の程度や、特に空調等の動的機器はダブルで置くとか、非常用電源設備が必須であるとか、あるいは耐震性等、リスクの大きさに見合った要求は安全設備が壊れたときのシリアスさとの関係で決まると思うが、どのような安全設備に対してどのような要求が必要であるかということは何か検討されているのか。

●小西氏

非常に粗い検討だが、トリチウムはエアボーンの場合と水に入っている場合がある。エアボーンの場合は大体全量の10分の1、負圧であり、トリチウム除去をしている。ただし、トリチウム除去するとしてもある程度はアクティブ(能動的な対策)となる。つまり、循環して出す過程において、例えばスクラバーを通す、サプレッションプールを通す、あるいはスプリンクラーやシャワーのような形で水の形のものは全て落とし、一方では建屋の閉じ込め障壁に関しては、テロリズムやハッキングのような形で全てのバルブが開けられるという事象も考える必要がある。つまり、完全に全壊といっても建物が粉々になることはないにしても、全ての安全障壁が不完全な状態になることを考えて、大体エアボーンの形で10分の1くらいのトリチウムが水素ガスで出たものについては実は評価の対象外であり、全て水とした場合になると思う。

ちなみに、耐震については考慮していない。基本的に装置は免震であるが、配管系は複雑なので必ずギロチン破断はあると思っている。スタックは建てても倒れることを予見して最初から地上放散で考えている。この場合の敷地境界での排出量は最大10グラムオーダーが出たとして、敷地境界の離隔距離によって変わってくるが、一番近い住民に対して5ミリシーベルトを確保するという想定で、確率論的によらない評価をして避難不要であるという考え方をする。

閉じ込め障壁については、基本的にはトリチウム除去装置があるが、これが壊れて機能不全で、あるいは建物、スタックも含めても基本的には壊れ得るものであるという評価をしての大体の評価になる。

これを超えた場合に確率論的な、あるいは信頼性の解析が入ってくる。今のところそれは要らないだろうというレベル、逆に言うとインベントリを抑える形でシステムを設計している。パッシブ(受動的)な安全性については、基本的には水媒体でしか人間と環境に悪影響をもたらさないもので、いろいろな方策も考えている。

○奥本委員

環境アセスメントのように、今後、第三者が評価するというようなことは考えていないか。

事業所内で評価すると、事業所内の暗黙知部分で行き届かないような評価があると思う。現在、核融合に関する環境アセスメントの第三者評価企業があるとは思えないが、今後、第三者評価企業自体も作って評価するという方向性はないのか。

●小西氏

私は外部側の人間として、もともとこの安全性の研究を二十数年やっている。外部側の人間が会社を作り、解析の基になるデータ、解析方法、例えば環境モデル、ここではコンパートメントモデルを使っているが、このようなものは公開して誰でもが検証可能で、しかもできれば申請者側でない専門家が解析をしたものを一般公衆、規制者、政府、あるいは文系の方でも分かるような形までかみ砕いた説明をして、理解いただいて初めて安全性の確保が成り立つと思っている。ここで考えた方法論については、基本的には社会全体で共有し、かつ第三者的な評価をする。逆に言うと、他の事業者が申請するときは、解析のアシストをすることで、ビジネスや社会に貢献しようというつもりで解析方法を検討している。

これまでの原子力の安全確保とは方法が違うが、高度な理論等、モデル等を駆使しなくても安全性が解析できる。例えば、核融合は具体的にはMELCORというアメリカで開発されたコードを使っているが、これも我々は使える。しかし、一般では手が出せないコードを使う場合は、それを説明できるような形までかみ砕くというのは第三者機関がやらなければいけないものだと考えているし、そのためのツールを供給する用意がある。

○遠藤委員

事業の予算または投資額について、大体の概要というのを教えていただきたい。2035年までに商用化ということだが、このような高度な研究開発はどのくらいの資金を投入すれば完成するのかを御教示いただきたい。

●小西氏

必ずしもこのタスクフォースの検討対象ではないかもしれないので一般論の形で説明する。

一般的に、このようなリスクがあるプラントは、その事業者の経済的な安定性や施策を実施するための資金があることが、安全性の評価の対象になり得ると考えている。予想されるリスクについて、事業者の資金の中でカバーできるかという、今の東京電力が陥っている状況を見れば分かるとおりに、できない場合にはバックアップは政府、公共機関、あるいはそれなりの保険というメカニズムを駆使して社会的にリスクを負う。弊社は、フュージョンエネルギーに関する実験をする場合には、全てのリスクに対してバックアップができるだけの資金、政府や損保等の社会的なバックアップも含めて、リスクを担保する用意がある。

一般的には、核燃焼実験の場合は少なくとも1,000億オーダーの資金が必要になる。これは、建設費用だけではなく、インフラ、廃棄物処理、施設の安全管理等の部分まで含めて数千億円が掛かるだろうと考えている。それを特定の1社が責任を持るとは考えていないが、事業を遂行できる程度に十分な資金を確保する手だてはある。しかし、リスクは、解析した結果によっては一つの事業体では責任を負えない場合があるので、その事業に許可を与えた公的機関、または政府にある程度のバックアップ遂行の必要性があると思う。

ちなみに、2035年に商業化とは一切申し上げてない。核燃焼装置として核融合でできたエネルギーを変換して発電する技術を含む様々なフュージョンプラントの機能をほとんど全て実証するだけの技術的なバックグラウンド、TRL、技術的な成熟度が核融合の業界どこを見てもないので、まずこのTRLを上げると

いうことを目的にこの事業は考えている。商業化はその先にある。

そこに至るまでの発電事業やトリチウムの取扱いも含めて、安全に実施できるということを技術的に実証するためのステップ及び運転については、しかるべき責任を持てる主体がやらなければならないが、その主体の中核になろうと考えているが、弊社1社ですべてをできるというわけではない。そのための資金、人員、組織についてはこれから構築していかなければいけない。それも含めて大体2035年までの事業計画と考えている。

このフュージョンプラント本体について、大体数千億円、3,000億円から5,000億円は多分必要だろうと思っている。最悪の事故事象を起こしたときに賄わなければいけない資金にオーダー的には近いと思うが、同一ではない。

まだ検討に至らないところがあるが、10年単位で蓄えたデータがあるので、いつでも皆様と共用して、かつ厳しい批判、指摘には対応させていただく。

② 株式会社Helical Fusion代表取締役CEOの田口氏より資料2に基づき説明

<主な質疑>

○波多野委員

スケジュールについて、プロトタイプはNon-nuclear-Operationということだが、ここはH等を使用して、トリチウムや中性子は発生しない段階で、次にいきなりこのFPPに移行するというプランだと考えてよろしいか。それに対する規制が2028年頃までには必要になるとすると、新しい材料や新しいコンセプトが多いので、チャレンジングかなと思っている。

●田口氏

現状のこのスケジュールではプロトタイプに関しては、H、軽水素で運転することを予定している。現状ではD-Tを使うことが難しいという前提の下での計画である。一方、国も含めて早めにD-Tを試験運転した方が良いという声もある。規制上、あるいは立地の整備が可能になれば、プロトタイプでもFPPに先立ってD-Tの試験運転をしてみたいと考えている。

○横山委員

第4期終了時におけるトリチウムの保有量が2～3キロであるが、最初からそのレベルで運転するのか、それとも最初は少ない量の生成があり徐々に増えていくのか、使用量の面ではどのような段階を考えているか教えていただきたい。

●中村氏 (Helical Fusion)

最初は、基本的にはだんだんと増えていくという形になる。トリチウムを使わない、いわゆるD-Dスタートアップと呼ばれる運転モードでのトリチウムの保有量をグラフに示す。グラフは上から順番に核融合出力、TD燃料比、真空容器内のトリチウム保有量、燃料貯蔵系におけるトリチウム保有量の経時変化を示す。第1期運転では、炉内でトリチウムが自己増殖するための期間である。第2期運転からは、自己増殖したトリチウムを燃料供給系から中に入れ、フルパワーで運転するフェーズになる。一方、液体金属ブランケットのトリチウムは、想定TBR1.15で自己生産して燃料貯蔵系に徐々に貯まっていくという算段になっている。

貯まったトリチウムは、例えば、今検討中の当社のFPPの次の世代の核融合炉で使用するということを考えている。余剰トリチウムの使い道がない場合、ブランケットにおけるトリチウムを成す6リチウムの濃度を下げて調整することを考えている。

○中村委員

発電方式について、リチウム鉛の自己冷却で発電されるようだが、ガスタービン、蒸気タービンを使わな

いでどのように発電する予定なのか。

●田口氏

発電部分について、詳細の説明を省いてしまったが、タービンを使用して発電する予定である。

○中村委員

300度、500度のリチウム鉛と熱交換して、水を加熱して蒸気で発電するということか。

●田口氏

温度はもう少し高いと思うが、2次系で液体金属から熱を取り出してタービンを回す予定である。

○大野委員

核融合出力について、Qが13であるが、このFPPは発電することでコントリビューションすると想定しているのか。

●田口氏

そのとおりである。

ただ、先ほど最後の方で中村が触れたとおり、タイムライン的に、特に炉壁の素材に関するデモンストレーションはFPPの前には難しいと思っている。発電での寄与も考えているが、実質的には材料の初期段階のフィージビリティスタディー、これもこのFPPでは実施することになるとしている。

○寺井主査代理

トリチウムのインベントリについて、どういう状況で増えていくのか。

多分、定常運転ではないと思うが、フュージョンパワープラントと言っても、恐らくエネルギーの増大はそれほど大きくなく、段階的に増えていくと思う。このため、炉の実証する内容は何か。つまり2034年からスタートして5年間でトリチウムを作ると2040年くらいにある意味この設計のフルパワーになるため、それ以降はトリチウム量としては定常となると理解したが、イメージや規模感はいかがか。時間的な流れを含めて説明願いたい。

●田口氏

最初のトリチウムに関しては、後ほど、中村から補足説明するが、全体像を改めて説明する。

このFPPは確かに実証の要素も含んでいるが、発電に寄与するものQ-engineeringで1を超えると想定しているので、限りなく商用炉、あるいは原型炉に近いものだと考えている。定常で50～100メガワット程度の電気出力を1年間継続することを想定している。

最初にトリチウムがない場合は、D-Dスタートアップで稼働せざるを得なくなるので、最初の1年間はトリチウムを貯め、それ以後は貯まったトリチウムを使って定常での定格運転をするということを考えている。

これを原型炉または商用炉と呼ばない理由は、この設計のブランケットで材料の劣化なく、コイルを保護できるかを試験してみないと分からない部分がある。今の設計であると、フルパワーで稼働できるのは5年くらいが寿命だと思っているが、実際に5年なのか、それ以上なのか、ブランケットをもう少し厚くしなければならないのか、このあたりを材料の劣化の試験とともに2号機以降にフィードバックさせて、より商用と呼べるようなものを作りたいと思っている。その意味でこの初号機をパイロットプラントと名付けている。

●宮澤氏 (Helical Fusion)

補足する。定常運転を目標とした炉であることを強調したい。1年間の定常運転の後は、3か月間のメンテナンス期間を経て再稼働するつもりである。つまりavailability80%以上を実証するのはこのFPPのミッションである。JA-DEMOや海外スタートアップでは稼働率の結果がないが、稼働率まで考慮しているのは我々が一番先んじていると自負している。

○寺井主査代理

稼働率が80%であることを理解した。寿命については、原型炉などは30年程度で考えていると思うが、パイロットプラントということで5年程度を目途にしていることは非常に重要かつ新しい情報だった。

●宮澤氏 (Helical Fusion)

あえて短い寿命だと思っていただければいい。今後30年間も待てない。5年程度である程度の結果を得たいと考え、短い寿命で進んでいる。

○寺井主査代理

タイムスケジュールでは、2034年から40年代の後半までD-Tオペレーションと書いてあるので、5年というのはちょっと違和感があったが、FPPを更に改造することもあり得るのか。

●宮澤氏 (Helical Fusion)

これは最速のスケジュールであり、資金も人材も無尽蔵に使い、理想的に遂行した場合はアポロ計画のようなスピード間であるが、資金が順調に集まらなかった場合は計画が遅れていく。

以上