

# 核融合炉システムの安全性について

東京工業大学 齊藤正樹

1. 核融合炉システムの安全上の特徴
2. 核融合炉システムの安全確保について
3. 今後留意すべき安全上の課題

## 1. 核融合炉システムの安全上の特徴

核エネルギーシステムの安全確保の基本の第一は、核分裂炉、核融合炉を問わず、「潜在的な放射性災害ポテンシャルの顕在化を防止すること」である。そのためには、「何をどう護るべきか？」が、安全設計の過程で議論される。潜在的な放射性災害ポテンシャルの源は内蔵する放射性物質の量とその性質（ソースターム）であり、一方、災害ポテンシャルの顕在化の源は制御不能な異常エネルギーの放出とそれに関連する機器・システムの異常の発生である。従って、核エネルギーシステムの安全上の特徴はシステム内に内在する災害ポテンシャル源（ソースターム）及びそれらを顕在化するプロセスをもとに議論される。

このような観点から、核融合炉システムの安全上の特徴について、核分裂炉システムと比較して、以下にまとめる。

### 1. 1 システム固有の安全性の特徴

核反応停止（止める）機能、除熱（冷やす）機能、放射性物質格納（閉じ込める）機能は、核分裂、核融合を問わず核エネルギーシステムの安全確保のための基本的な機能である。従って、まず、この三つの観点から、核融合炉システムと核分裂炉システムのシステム固有の基本的な安全性の特徴について比較する。

#### （1）核反応持続・停止

##### 核分裂炉

- ・ 核反応維持条件は炉内の中性子バランスで決まる。中性子の実効倍率が 1（臨界）を維持する限り、炉心物質（材料）の選択とその空間配置は自由である。
- ・ 炉内には、通常 1 ～ 4 年間分の燃料を装荷している。
- ・ 反応度の異常な挿入に対し、ドップラー効果等固有の反応度フィードバック特性による自己制御性をもつ。
- ・ 異常時には、中性子吸収材（制御棒等）の投入により核反応は、停止する。

##### 核融合炉

- ・ 核反応維持条件は、システムのエネルギーバランスで決まる。自己点

火条件は、高真空中に、一定密度以上の燃料を超高温に加熱し、一定以上の時間、閉じ込めることよりはじめて達成される。したがって、核分裂炉に比べて、核反応維持条件達成は比較的厳しい。

- ・ 燃料の供給がとまると核反応は停止する。
- ・ 炉内に燃料以外の物質は持ち込めない。従って、異常時に、不純物が混入すると核反応は停止する。
- ・ 炉内に滞在する燃料の量は少量で、異常な核反応エネルギー放出は大きくない。

## (2) 除熱

### 核分裂炉

- ・ 核反応生成エネルギーのほとんどは核分裂生成物の運動エネルギーとして与えられ、被覆管内の燃料ペレット中で熱化する。冷却は外側を流れる冷却材によって行う。
- ・ 発熱分布は、一般の円柱均質炉心では、ほぼ cosine 状の比較的平坦な体積発熱分布である。
- ・ 核反応停止後の崩壊熱は、主に燃料ペレット内の核分裂生成物等によるものである。

### 核融合炉

- ・ D - T 核融合反応の場合、核反応生成エネルギーの約 8 割は中性子に与えられ、第一壁やブランケット内で発熱する。その発熱分布は空間的減衰が大きく、指数関数的な体積発熱分布である。
- ・ D - T 核融合反応の場合、核反応生成エネルギーの約 2 割は核反応生成物であるヘリウムの原子核に与えられ、最終的には、プラズマ対向壁（第一壁やダイバータ板等）で吸収され、局所的に高い表面熱流束をもち、除熱条件は比較的厳しい。
- ・ 崩壊熱は、中性子によって放射化された構造材の誘導放射能によるもので、その総量は核分裂炉の場合に比べて少ない。しかし、各部に分布し、また、複雑な形状の構造物の冷却が必要である。

## (3) 格納

### 核分裂炉

- ・ 放射性物質は炉心に集中しており、それらは燃料ペレット、被覆管、原子炉容器を含む冷却材バウンダリー、格納容器と多重の物理障壁で覆われ、環境への放散を防いでいる。

### 核融合炉

- ・ 放射性物質は真空容器内の炉心部分に多く存在するが、真空排気系や燃料循環系等システムの各所に広く分散している。真空容器、クライオスタット、建家等多重障壁を考慮されているが、一部貫通部があり、異常時の考慮が必要である。

## 1.2 ソースタームの特徴

核融合炉では、超ウラン元素や放射性核分裂生成物は生成しないが、主なソースターム源として燃料のトリチウムと構造材の誘導放射能がある。

半減期が 12.3 年で弱い 線を出すトリチウムは

(1) 移動性および透過性が高い

(2) 可燃性である

(3) 環境中および人体中での希釈が速く、ほとんど濃縮しない

等の特徴をもち、気体、液体、また吸蔵された形態で多くのサブシステム内に分散して存在し、通常運転時には、サブシステムの間を移動している。従って、保守・点検時を含め、トリチウムの漏洩に対する十分な配慮が必要である。

ITER概要設計報告書によれば、施設内のトリチウム保有量は約2.8 kg (約 $10^{18}$ Bq)と評価され、そのうち、約1.2 kgが真空容器内(主に、ブランケット、ダイバータ等の機器に吸着)に、また残りは燃料処理貯蔵施設の各機器に分散して存在する(これらの値は、今後の設計の進捗により増減されることが想定される)。(1)

構造材の誘導放射能は、構造材が溶融や蒸発(昇華)を起こさない限り、移動しないソースタームであるが、一方、この問題は保守・点検時の被ばくや使用後の処理・処分の問題に関連して重要な課題である。誘導放射能は、中性子のエネルギーや照射量さらに構造材の種類によって異なる。また、中性子の数は同一出力の炉では、核分裂炉システムに比べて核融合炉システムの方が約5倍程度多い。また、核融合炉システムでは、トリチウム増殖のため( $n, 2n$ )反応で中性子を増倍することがある。鉄系の構造材は、長寿命核種を生成するので、長期にわたって放射能が残存するが、量的には、核分裂炉システムに比べて少ない。

冷却材配管の腐食性生物や真空容器壁からの侵食ダストもソースターム源となる。これらは、構造材の誘導放射能に比べて少ないが、安全設計上考慮しておく必要がある。特に、真空容器内の放射性ダストは、移動性も高いので、その生成・移動メカニズムを十分研究しておくことは重要である。

ITER概要設計報告書によれば、放射化ダストについては、これまでの実験結果等を踏まえ、管理上、タングステンダストが100 kg、ベリリウムダストが100 kg、炭素繊維複合材のダストが200 kgを上限として存在するとしている。(1)

事故時の環境への放射性物質の放出量とその時定数は、放射性物質の移動性(形態)に大きく依存する。従って、その量の他に、移動性(形態)に基づいて、易動性放射性物質(バウンダリーの健全性が損なわれると、エリア外に放出される放射性物質、制御性放射性物質(潜在的には易動性であるが、動的機能によって移動性が制御されている放射性物質)、難易動性放射性物質(動的に制御されていない移動性の低い放射性物質)に分類して議論することが重要である。(2)(3)一般的には、これまでの核融合炉設計に於いて量的に、難易動性放射性物質>制御性放射性物質>易動性放射性物質の関係がある。(2)

### 1.3 エネルギー源の特徴

核分裂炉システムにおいては、エネルギーの発生は、大量の放射性物質が内在する炉心に集中して起こる。従って、炉心の安全確保（発熱と除熱のバランスの確保）が最も重要である。もし、何らかの異常で発熱に対する除熱能力が低下すると、異常な熱的および機械的エネルギーの偏在化が起こり、炉心が損傷し、大量の放射性物質の漏洩につながる可能性がある。

核融合炉システムにおいても、異常なエネルギー発生は、バウンダリーを破損し、放射性物質の漏洩をもたらす可能性がある。しかし、核融合炉システムでは

- （１）核融合反応エネルギー
- （２）ブランケット内の構造材や冷却材の蓄熱エネルギーおよび崩壊熱
- （３）プラズマの熱および電磁エネルギー
- （４）化学エネルギー〔トリチウム、構造材（遷移金属、グラファイト）、リチウム等〕

（５）マグネットの磁気エネルギーおよび冷却系の冷熱エネルギー等、システム内の各部に多種多様なエネルギー源が分散している。また、空気や水と接触すると化学反応により大量のエネルギーを放出する物質も内在しているため、それらに対する対策も重要である。

表１<sup>(1)</sup>に、ITER施設におけるエネルギーと考慮すべき荷重を示す。

表１ 放射性物質を内蔵する機器に作用するエネルギーと考慮すべき荷重

放射性物質を内蔵する 主要な機器等	作用するエネルギー	考慮すべき荷重
真空容器	・核融合出力（約500MW） ・プラズマが保有する熱エネルギー（約400MJ） ・プラズマに入射するエネルギー（約50MW）	核融合出力の増大（熱源異常）による熱負荷 通常熱除去機能の喪失による熱負荷及び電磁力
	放射化に伴う崩壊熱（最大0.5MW/m <sup>3</sup> ）	通常熱除去機能の喪失による崩壊熱による熱負荷
	冷却水の内部エネルギー	真空容器内での試験機器損傷に伴う冷却水放出等による過圧
	プラズマの保有する磁気エネルギー（約300MJ）	ディスラプションによる熱負荷及び電磁力
	超伝導コイル系中の磁気エネルギー（約50GJ）	超伝導コイルの短絡等による超伝導コイルの変形
燃料処理貯蔵施設	液体水素同位体の内部エネルギー	冷凍機能の低下による過圧
ブランケット及びダイバーター一次冷却系	冷却水の内部エネルギー	冷却系の圧力制御の故障等による過圧

#### 1.4 安全上の特徴のまとめ

核融合炉システムは、エネルギー発生、輸送、変換に加え、燃料の生産、精製、加工、注入、排気、貯蔵といった機能をもつ多くのサブシステムが複雑に組み合わされて構成されており、通常運転時には、放射性物質である燃料はサブシステム間を移動している。また、エネルギー源も各部に分散している。

このように核融合炉システムでは、核分裂炉システムに比べ、放射性災害ポテンシャル源及びそれを顕在化させるエネルギー源がシステム内に広く分散しているといえる。この特徴を十分考慮した安全確保の方策が望まれる。

#### 2. 核融合炉システムの安全確保について

例えば、ITERは工学的実証を目指した試験研究炉であり、そのため特殊な運転や機器の分解・点検の頻度が高いことが予想される。

ソースタームや各種エネルギー源が分散している核融合炉施設に於いては、平常運転時の従業員の被ばくや放射性物質の環境への放出を「合理的に可能な限り抑制するよう十分配慮すること（As Low As Reasonably Achievable: ALARA の考え方）」が、先ず第1に安全設計に要求される。

また、システム内の異常に対しては、

(1) 異常発生防止

(2) 異常拡大防止

(3) 異常が拡大し事故に発展したとしても、影響を緩和する

ためのそれぞれの階層における対策（深層防御の原則）を十分考慮することが重要である。

このためには、前もって、核融合炉システムの安全確保のための基本原則（何をどう護るべきか）を明確にしておく必要がある。しかし、ソースタームやエネルギー源はシステム内に広く分散している核融合炉システムでは、特定の護るべき項目を定義するのは困難である。

従って、放射性物質のリーク構造に基づいて、一般に護るべき項目が定義され、以下に述べるように安全確保の考え方が議論されている。<sup>(2)(3)(4)(5)(6)</sup>

ソースタームの生成とリークパスの形成が放射性災害を引き起こす重要な因子であり、ソースタームの生成とリークパスの形成の源となる「システム内の異常エネルギーの放出やそれに関連する機器・システムの異常の発生を防ぐこと」が、先ず第1の護るべき項目である。

次に、ソースタームの生成に関連する「放射性物質の易動に関する制御性」が護るべき第2の項目である。

また、放射性物質を閉じ込めている各バウンダリーの健全性喪失は、大量の

放射性物質放出のリークパスを形成する。従って、各領域の「バウンダリーの健全性確保」が第3の護るべき項目である。

深層防護の原則を満たすための現実的な選択としての「格納系の健全性は、最後の護るべき項目」として、前者の護るべき項目のバックアップとして期待される。

システム内の異常なエネルギー放出防止やそれに関連するシステムの異常の発生防止、更に、万一これらの異常が発生した場合でも、第2、第3の上記項目を如何に護るかが、安全設計上重要であるが、一般には、各ソースタームの量や易動性及び異常放出されるエネルギー量や形態によりその重要度は異なる。  
(2)(3)(4)(5)(6)

以下に、放射性物質リーク構造に基づいて摘出された安全設計上及び安全評価上重要な安全研究課題例を示す。

(1) 異常エネルギー発生に関する研究課題

- ・プラズマ過出力挙動（停止機能の確認）
- ・プラズマデスラプション挙動
- ・プラズマ異常加熱挙動
- ・第1壁、ダイバータ冷却性（事故時）
- ・第1壁材（グラファイト、W、Be、ダスト等）と空気、水蒸気の化学反応（水素生成挙動を含む）
- ・真空容器内LOCA挙動（内圧上昇挙動）
- ・磁場系異常挙動（液体ヘリウムリーク挙動含む）
- ・水素燃焼挙動
- ・ダスト爆発挙動

(2) バウンダリーの健全性に関する研究課題

- ・真空容器壁健全性（ポート部含む）
- ・冷却材配管破損挙動
- ・クライオスタット健全性
- ・フィルター健全性（事故時）

(3) ソースターム挙動に関する研究課題

- ・ダスト内トリチウム吸蔵及び放出挙動
- ・第1壁材内トリチウム吸蔵及び放出挙動
- ・冷却材トリチウム生成・移行・放出挙動（LOCA時）
- ・増殖材内トリチウム生成・移行挙動（平常時、事故時）
- ・環境でのトリチウム移行挙動

- ( 4 ) 物質移動挙動に関する研究課題 ( ( 1 ) ( 3 ) の起因となるもの )
  - ・ 真空容器内 L O C A 挙動 ( ダスト移行挙動含む )
  - ・ 真空容器内空気流入挙動 ( ダスト移行挙動含む )
  - ・ 液体ヘリウム漏洩挙動 ( 臨界 2 相流挙動 )
  - ・ 水素と空気の混合挙動
  - ・ ダストと空気との混合挙動

### 3 . 今後留意すべき安全上の課題

- ( 1 ) ソースターム及びエネルギー源の分散性
- ( 2 ) 真空容器周りのソースターム
  - ・ 真空容器内機器に吸蔵されるトリチウム
  - ・ 放射化ダスト
  - ・ ダスト内トリチウム
  - ・ 真空容器内冷却水流出事象 ( 高温金属壁 水 ( 蒸気 ) 反応 )
- ( 3 ) 点検・保守時の被ばく低減方策
- ( 4 ) 安全評価上想定すべき具体的な設計基準事象、立地評価事象
- ( 5 ) 安全評価手法の確立 ( 検証 ) 及び関連するデータベースの構築
- ( 6 ) 耐震設計
- ( 7 ) 安全機能を有する構造物、系統、機器の “ 重要度分類 ”
- ( 8 ) 退避処置の考え方

#### ( 参考文献 )

- ( 1 ) I T E R 施設の安全確保の基本的な考え方について、旧科学技術庁、平成 1 2 年 7 月
- ( 2 ) Y. Fujii-e et al., “Safety Analysis and Evaluation Methodology for Fusion Systems”, Res Mechanica, 27, 1&2 (1989)
- ( 3 ) Y. Fujii-e at al., “Development of General Methodology of Safety Analysis and Evaluation for Fusion Energy Systems (GEM-SAFE)”, Fusion Engineering and Design, 12 (1990) 421-447
- ( 4 ) 藤家洋一、齊藤正樹、“ 4 . 実用核融合炉の社会的受容性確保のための方策 4 . 1 安全性と材料技術 ”、プラズマ・核融合学会誌、7 0、6 ( 1 9 9 4 ) 6 2 3 - 6 2 7
- ( 5 ) T. Sawada, M. Saito and Y. Fujii-e, ”Application of GEMSAFE to ITER CDA and Its comparison with FER”, Fusion Energy, Vol. 12 Nos. 1/2(1993) 107-113
- ( 6 ) 齊藤正樹、“ 核融合炉の基本設計、C . 社会的受容性、 安全性 ”、機械の研究、第 4 7 巻、第 1 号 ( 1 9 9 5 ) 2 1 3 - 2 1 7

## （参考用）

### ITER施設の安全確保の基本的な考え方について（参考文献（１）より抜粋）

#### （１） 平常時における放射線防護

平常時における公衆及び従事者に対する放射線防護のため、施設には放射線しゃへい、換気、並びに適切な浄化・希釈性能を有する排気設備及び排水設備を備えるとともに、トリチウム等の放射性物質を内蔵する機器等の使用・環境上の条件を考慮して、それらからの漏洩を制限する。

また、放射線管理及び防護活動のための適切な施設並びに器材を備えること。

ITER施設で講じた施策により、公衆に放射線障害を及ぼすおそれがないことを確認するために、以下の評価を行うこと。

公衆への放射線被ばくを合理的に達成できる限り低く維持する設備の性能の妥当性を確認するため、排気・排水に伴う放射性物質の放出に起因する年間実効線量当量及び施設から放出される放射線（直接放射線及びスカイシャイン放射線）による年間の線量がALARAの精神に基づき設定した目標（年100  $\mu$ Sv）を満たすことを評価すること。

なお、排気・排水に伴う放射性物質の放出に起因する年間実効線量当量の評価に際しては、通常運転時及び保守・補修に伴い放出する全ての放射性核種及び放出経路を考慮すること並びに想定され得るあらゆる被ばく形態及び被ばく経路を考慮すること。

#### （２） 事故の発生防止

放射性物質を内蔵する機器等にあつては、施設内のエネルギー、使用・環境上の条件及び真空容器内の試験機器の試験条件を考慮して、その構造的健全性を確保するとともに、内蔵される放射性物質が機器等の外部に異常に放出することを防止すること。

また、ディスラプションによる荷重は、その発生頻度に応じ設計条件として考慮すること。

なお、放射性物質を内蔵する機器等の設計、製作及び検査については、それらの構造強度を確保する上で適切と認められる規格・基準等によること。

#### （３） 事故の影響の緩和（コンファインメント施設）

放射性物質の異常な放出を伴うような事故を仮定しても、放出放射性物質の環境への異常な放出を防止できるよう、コンファインメント施設を設けること。コンファインメント施設は、放射性物質を内蔵する機器等の破損等により放射性物質が機器等の外部に放出した場合に、当該機器を取り囲む区画（コンファインメント区画）を周囲から適切に隔離し、この区画内を負圧に維持するとともに、区画内の雰囲気浄化し、環境への放出経路を排気筒に限定することにより、公衆に過度な放射線被ばくをもたらすおそれを十分小さくできる設計であること。



ITER施設で講じた施策の妥当性を確認するために、以下の評価を行うこと。

技術的見地からみて放射性物質の放出が最大となる事故を放出経路毎に想定し、深層防護の観点から事故時の影響緩和機能を担うコンファインメント施設の性能の妥当性を確認すること。判断基準としては、公衆の実効線量当量として5 mSv（ICRPの補助的線量限度に準拠）を用いること。

事故の代表的な事象については、内蔵する放射性物質の量及びその放出の駆動力を考慮して選定すること。

影響評価にあたっては、試験機器の使用条件、化学反応、放出放射性物質の形態・性状、放出経路・移行率、除去系の性能、拡散条件等を十分に検討し、妥当な保守性を加味した解析条件とするとともに、動的機器の故障の仮定、商用電源が利用できない場合等も考慮すること。

また、漏洩トリチウム等による火災・爆発の可能性についても併せて評価すること。

なお、公衆の放射線被ばくの評価にあたっては、必要に応じ直接放射線及びスカイシャイン放射線による線量を加算すること。

想定する事故及びその影響評価にあたっては、以下に留意すること。

- ・ ブランケット及びダイバータ等のプラズマに対向する機器では、温度上昇に伴う水蒸気等との化学反応或いは放射化した対向材料の昇華等の影響について、局所的な温度上昇に伴う影響も含めて十分に考慮すること。
- ・ 影響評価に用いるトリチウム、放射化ダスト等の放射性物質の量は、試験装置としての運転上の柔軟性を確保するため考慮して保守的な値とすること。
- ・ 影響評価にあたっては、ITER施設の安全上の特徴を踏まえ、安全確保を目的に設置する施設以外の施設であっても、その施設の信頼性等を考慮した上で、安全機能として取り扱うことも妥当とする。

#### (4) 立地に対する考慮

ITER施設の予備的評価によると、技術的見地から想定し得る放射性物質の放出が最大となる事故（設計基準事故）が発生しても、公衆の実効線量当量の最大値は5 mSvを超えないという結果が得られている。

一方、ITER施設は、本格的な長時間DT燃焼を行う初めての試験装置であること、及び内蔵する放射性物質の全量が地上放出すると周辺公衆に過度の放射線被ばくをもたらす得ることに鑑み、設計基準事故を超える放射性物質の放出を工学的観点から仮想し、規制上の観点から、ITER施設と周辺公衆との間の離隔の適否、並びに、敷地外における緊急時計画（防災対策）の必要性の有無を評価することとを考慮する。

#### 今後の課題

設計基準事故を超える事故の想定及びそれに対する公衆の安全確保に係る評価の基準に関しては、ITER施設の目的、安全上の特徴等を考慮して検討する必要がある。

る。

(5) 火災に対する考慮

ITER施設は、火災発生の防止を設計の基本とするが、万一に備え、火災検知及び消火、並びに火災による影響の軽減の方策を適切に組み合わせて、火災によってもITER施設の安全性が確保できるよう設計すること。

今後の課題

真空容器及び燃料処理貯蔵施設等は、万一の事故の場合でも隔離弁あるいは周囲雰囲気の不活性化等により、水素火災を防止することとしているが、局所的な燃焼については、現在十分な情報が得られていないことから、今後、局所的な燃焼に対する考慮を検討する必要がある。