

第6回 安全確保検討タスクフォース

核融合原型炉の安全検討

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グループ

染谷洋二

設計方針: 技術的に成立しうる原型炉概念

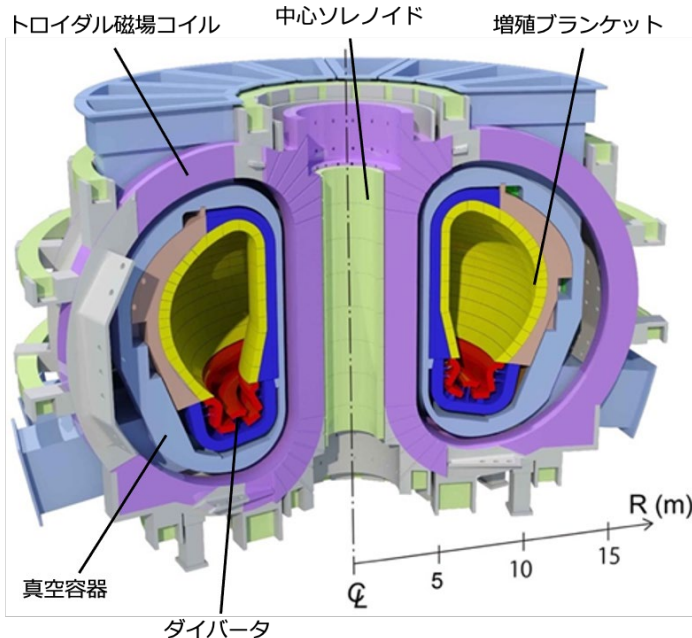
- 超伝導コイルなどのトカマク機器、加熱・電流駆動などの周辺機器、三重水素処理管理設備などの主要機器・設備については、ITER技術基盤の延長に概念を構築
- 原型炉に特有な技術については、産業界での発電プラント技術及び運転経験並びに大学等による先進的な物理的知見を取り入れた概念を構築
- 炉心プラズマについては、ITER及びJT-60SAの成果に基づいた概念を構築



核融合科学技術委員会の提示した
原型炉の目標

- ① 数十万kWの電気出力
- ② 実用に供し得る稼働率
- ③ 燃料(三重水素)の自己充足性
に見通しを得る基本概念を構築

概念設計で検討中の設計パラメータ



方式: トカマク型磁場閉じ込め
 主半径: 8.5m
 小半径: 2.42m
 核融合出力: 1.5GW
 発電端出力: 0.64GW
 中心トロイダル磁場: 6T
 プラズマ電流: 12.3MA
 加熱入力: < 100MW
 規格化ベータ値: 3.4
 規格化密度: $n_e/n_{GW}=1.2$
 閉じ込め改善度: 1.3
 冷却水 (PWR条件)
 稼働率: ~70%
 運転方式: 定常運転
 三重水素増殖比: 1.05

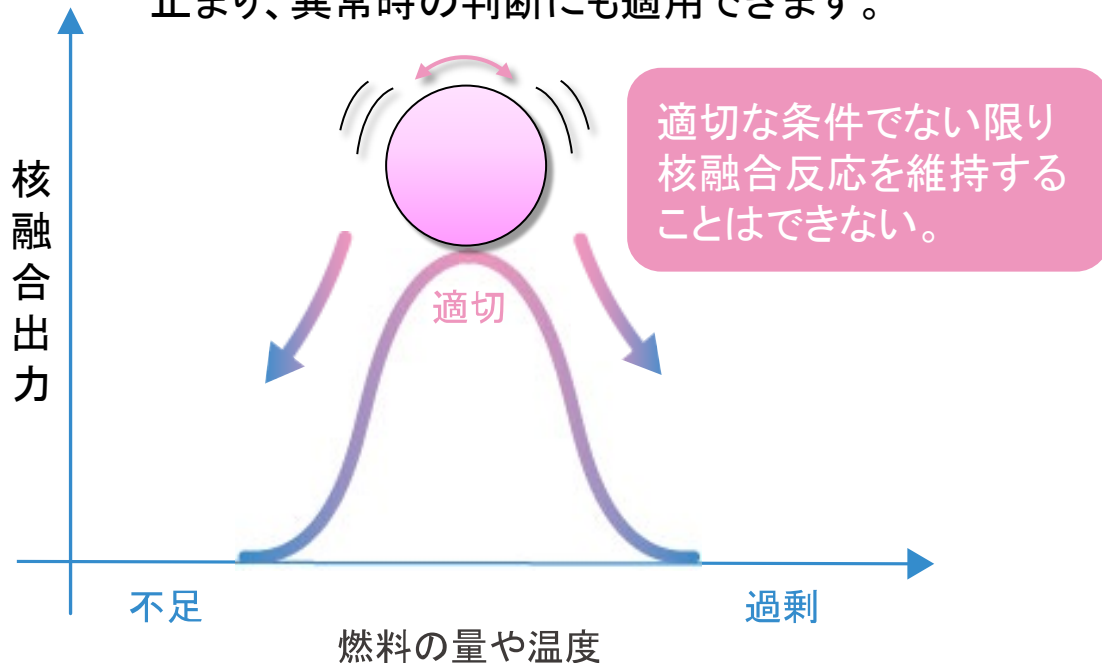
概念の特徴

- 誘導電流駆動によるIp立ち上げ: $R_p=8.5m$
- ダイバータ熱負荷低減: $P_{fus}=1.5GW$
- 運転柔軟性: 定常運転 & パルス運転
- 燃料増殖と発電方法: 固体水冷却方式
 - ✓ ITER-TBM開発での知見に基づく原型炉ブランケット設計
 - ✓ 冷却材には加圧水
(圧力: 15.5MPa、出口温度: 325°C, $\Delta T: 35^\circ C$)を採用
→ 補機システムはPWR設計を踏襲
- 安全設計とその特徴:
 - ✓ ITER誘致時に策定した安全確保の基本的な考え方を踏襲
 - ✓ 固有の安全性: 受動的に反応が止まる、自然に冷える
→ 放射性物質の閉じ込めが主な安全要件

核融合反応は受動的に「止まる」

核融合反応は、単発反応で、ある一定の条件を満たさないと反応を持続できない。何らかの外乱や異常が発生すると受動的に反応が**止まる** 固有の安全性を有する。

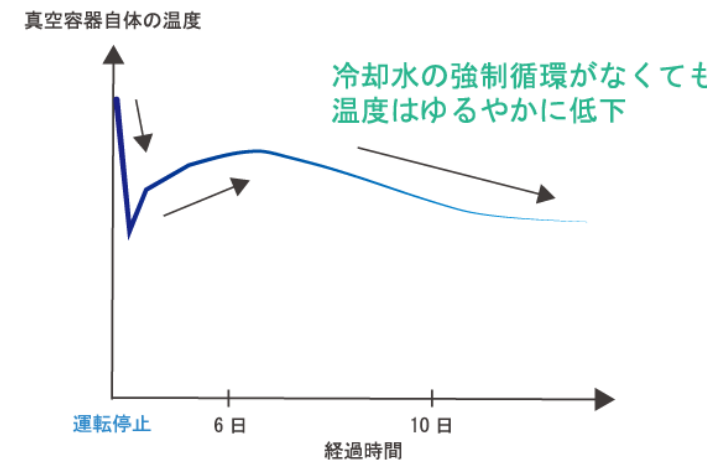
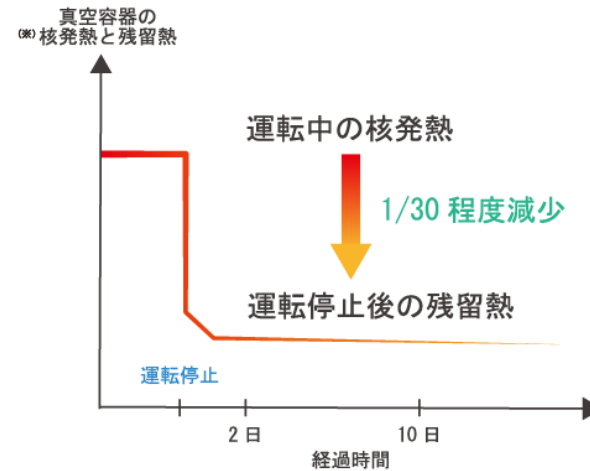
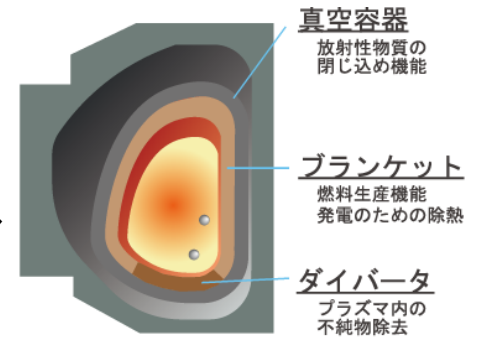
- 例えば、燃料の過不足や温度が高/低すぎてもプラズマ運転領域の限界を超え、受動的に消滅する。
- 微量な冷却水の漏洩や不純物の混入でもプラズマは止まり、異常時の判断にも適用できます。



装置は自然に「冷える」

中性子による放射化に伴う残留熱密度が十分に小さく、安全上の重要な機器は自然に冷える という特徴を有する。

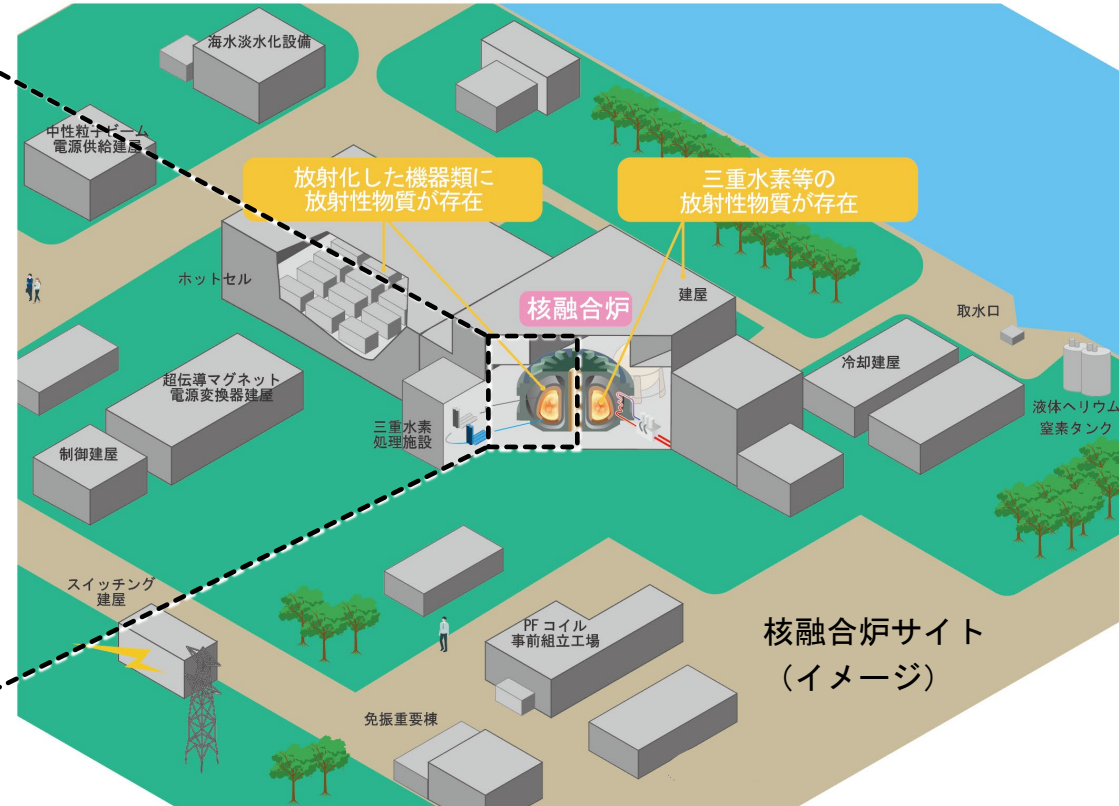
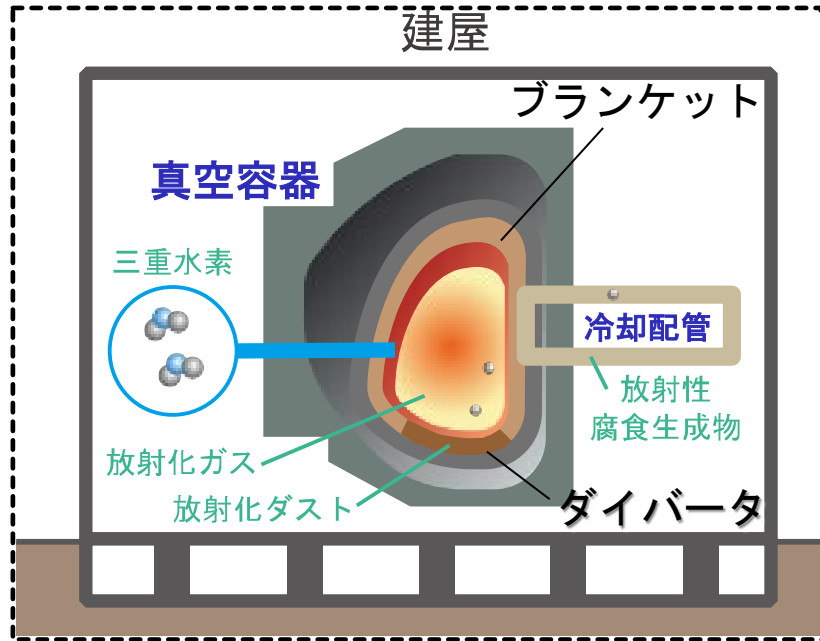
異常時に放射性物質を閉じ込める役割を有する真空容器の放射能濃度は十分に小さく、よって停止後の残留熱も小さく、自然対流によって冷える。



(※) 核発熱：運転中の核反応で発生する発熱
 残留熱：運転停止後に放射化機器の誘導放射能に起因して発熱

○ 内部エネルギー

エネルギー (GJ)		JA DEMO	参考: ITER
プラズマ	熱	0.87	0.36
	磁気	0.45	0.37
超伝導コイル	磁気	166	~ 50
冷却水	ブランケットエンタルピー	1,300	227
	ダイバータエンタルピー	230	76
残留熱	運転終了直後 (MW)	40	11



○ 内在する放射性物質

放射性物質	特徴	存在箇所	暫定値など
三重水素	核融合炉の燃料	真空容器 (VV)、燃料サイクル機器、冷却水、ホットセル	4 kg (目標値) VV内気体状態 (0.22 g-T)
放射化 (W) ダスト	プラズマ対向壁 (W) から発生するダスト	真空容器、ホットセル	評価中: 1000 kg (ITERの管理値を仮定)
放射性腐食生成物	配管から冷却水中に溶け出した腐食生成物	冷却配管	~ 90 kg/loop/年 (発生量)
放射化ガス	プラズマからの熱負荷低減に用いる希ガス	真空容器、燃料サイクル	評価中: アルゴンを仮定
その他の放射化物	真空容器やその中の機器、放射線遮蔽体など	真空容器、ホットセル	炉内機器などの金属放射化物が発生

- ✓ 流動性がある主なソースタームは三重水素
→ 真空容器を含む燃料サイクル機器内に存在
- ✓ 反応が受動的に止まり、機器は自然対流で冷える
→ 放射性物質の閉じ込めが主な安全要件
- ✓ 微量な冷却水/不純物で反応が受動的に止まるため、き裂進展による破断は起きにくい。万が一を想定して最悪な条件で設計圧力を定め健全性を確保。

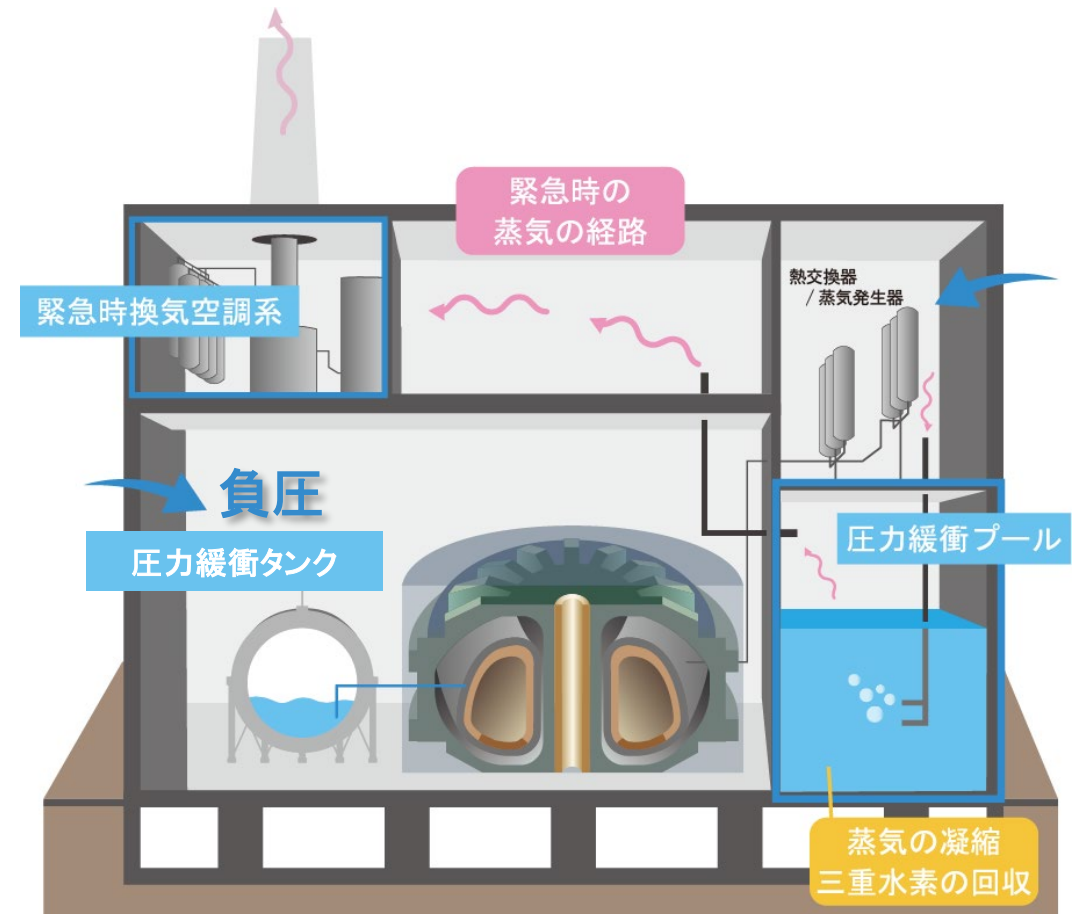
放射性物質の閉じ込め

放射性物質を内包するプラズマ真空容器などは、技術的に極端な事象を想定した圧力条件で設計、プラズマ真空容器は超伝導コイルの断熱を行うクライオスタット内に配置、建屋内は負圧に維持され環境への放射性物質の漏洩を低減。



影響緩和方策

建屋の閉じ込め・管理領域は、技術的に極端な事象を想定しても、放射性物質が環境へ放出される量を抑制・管理するための対策として、圧力緩衝タンクや緊急時換気空調系を装備。



想定起因事象による影響度の解析

分析：FFMEA*により抽出

ITERでの経験を踏まえ原型炉設計パラメータに基づき影響度解析を実施



原型炉に特有な事象を分析

抽出した主な起因事象

- ① 燃料過注入等による過出力
- ② デイスラプションによる過剰な熱エネルギーの伝播
- ③ デイスラプションによる過大な電磁力の誘起
- ④ 通常運転時の除熱異常
- ⑤ 真空容器内外での冷却水漏洩事象
- ⑥ トロイダルコイルの短絡
- ⑦ 運転停止後の除熱異常
- ⑧ ブランケット筐体内冷却配管破断事象



* FFMEA (Function Failure Mode and Effect Analysis)

基本的にはITERと同様の安全確保策で対応可能

原型炉で考慮すべき項目：

⑤について、原型炉では発電のために高温・高圧の冷却水（15.5 MPa, 300℃）を想定、このため過圧力に加えて水素などの反応生成物の影響評価が必要

- ✓ 冷却水漏洩時に発生する高温高圧蒸気の加圧影響
- ✓ 当該蒸気との化学反応で発生する水素影響

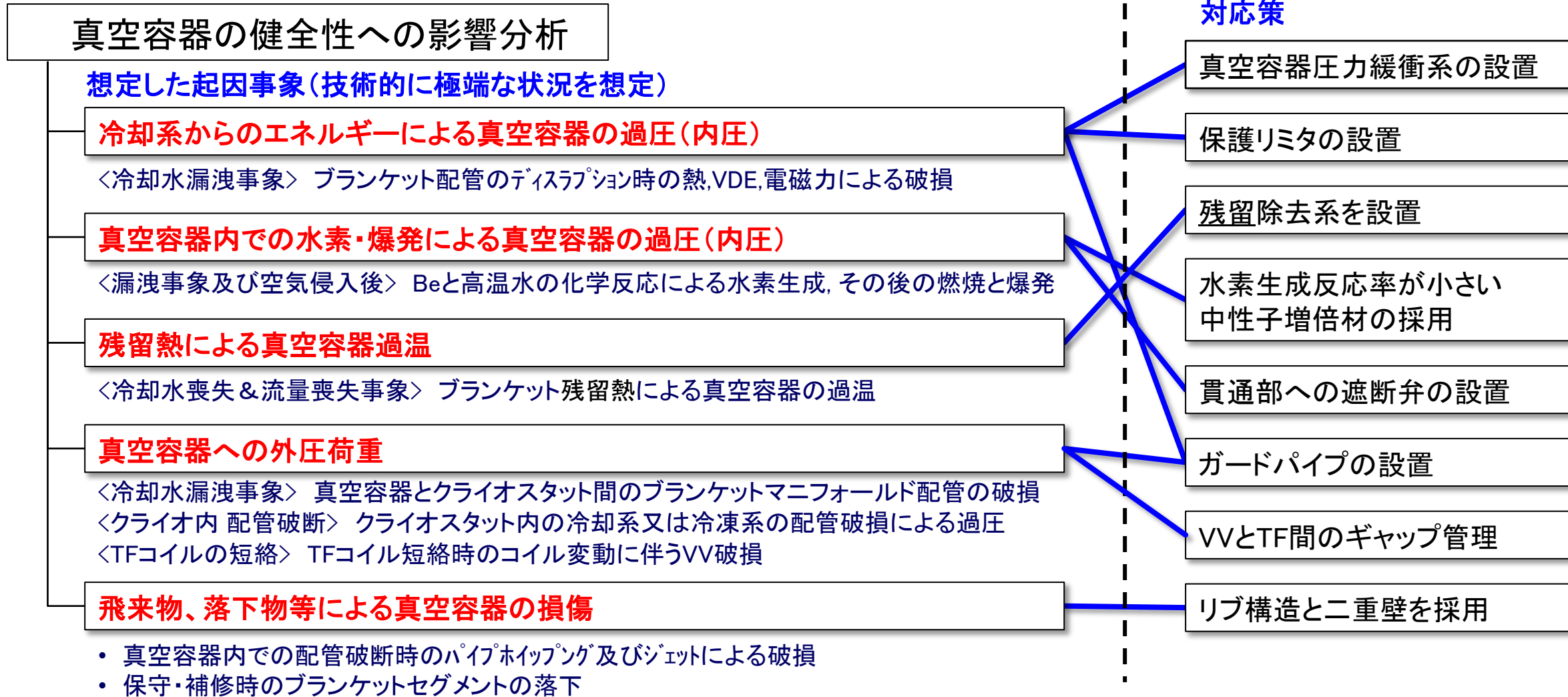
⑦については残留熱に対する温度応答が評価対象。残留熱の密度は照射される材質と中性子壁負荷に依存。ITERに比べて原型炉での中性子壁負荷は高い

- ✓ 真空容器は自然対流で温度維持
- ✓ 炉内機器損傷に伴う冷却水漏洩時の加圧影響

⑧増殖ブランケットに起因する事象は原型炉 特有

- ✓ 冷却水漏洩時に発生する高温高圧蒸気の加圧影響
- ✓ 当該蒸気との化学反応で発生する水素影響

真空容器(放射性物質の閉じ込め障壁)の健全性に影響を及ぼす増殖ブランケットに起因すると想定される事象とその対応策の整理



真空容器内冷却水漏洩事象:

微小の冷却水漏洩などで反応は受動的に止まるため、ギロチン破断は起き得ないが、
万が一を想定した最悪な圧力/温度条件を解析・評価 → 機器の設計条件に反映

真空容器外冷却水漏洩事象:

極端なギロチン破断を想定した圧力/温度条件を解析・評価 → 機器の設計条件に反映

安全解析項目		安全機能と解析結果
1	真空容器内冷却 配管破断事象 (閉じ込め領域への加圧影響)	BLK第一壁配管 リミターによるブランケット防護と圧力緩衝タンクの設置により 真空容器は損傷無く終息
2		DIVバツフル配管 系統内の逆止弁と圧力緩衝タンクの設置によりVVは損傷無く終息
3		DIVターゲット配管 圧力緩衝タンクの設置によりVVは損傷無く終息
4		リミター第一壁配管 圧力緩衝タンクの設置によりVVは損傷無く終息
5		上部ポート内マニフォールド配管 (BLK&リミター) 圧力緩衝システムとガードパイプの設置により環境漏えい無く終息
6		下部ポート内マニフォールド配管 (DIV):DIV排気系 圧力緩衝システムと遮断弁の設置により環境漏えい無く終息
7		* LOCA後にECH導波管系 統内の窓材部 圧力緩衝システムの設置により環境漏えい無く終息
8	真空容器外冷却 配管破断事象	BLK主冷却系配管 圧力緩衝システムの設置により環境漏えいは軽微
9	(閉じ込め領域への加圧影響)	DIV冷却系配管 (バツフル) 圧力緩衝システムの設置により環境漏えい無く終息

ディスラプション時炉内機器ギロチン破断(技術的に極端な状況)を想定

- 運転上必要な保護リミターと真空容器圧力緩衝系の効果により、技術的に極端な状況であるギロチン破断を想定した場合でも圧力上昇を抑制
 - ✓ リミター機器は第一壁より少し突き出た機器で、プラズマを覆うように90度おきに設置(リミターは運転上必要)。
 - ✓ リミターが破損した場合でも圧力上昇は真空容器の許容圧力以下に十分な裕度をもって維持できる。
- バッフル冷却系統内の逆止弁と真空容器圧力緩衝系の効果により、技術的に極端な状況であるギロチン破断を想定した場合でも圧力上昇を抑制
 - ✓ 逆止弁による時間遅れで圧力上昇が緩和される。
(逆止弁は通常設計の範囲内で設置される)

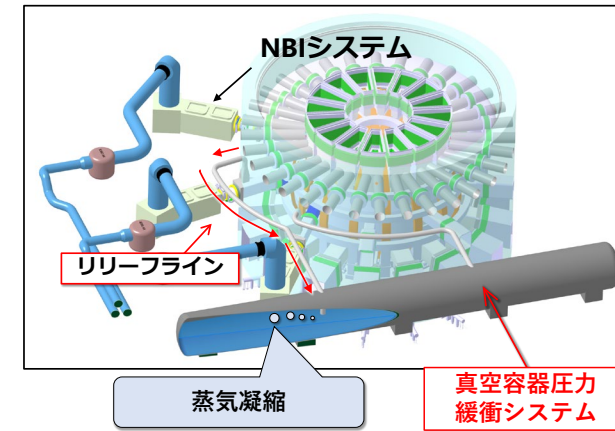
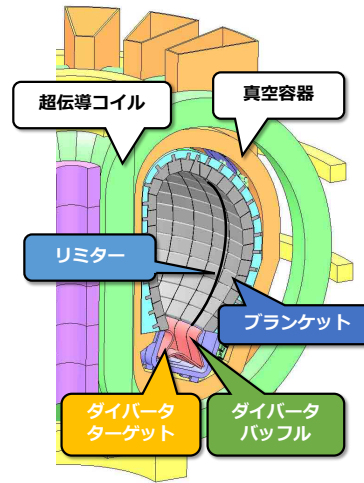
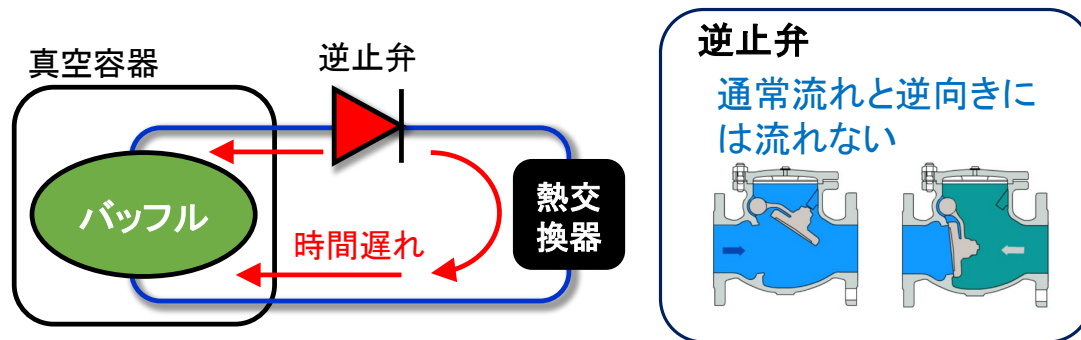


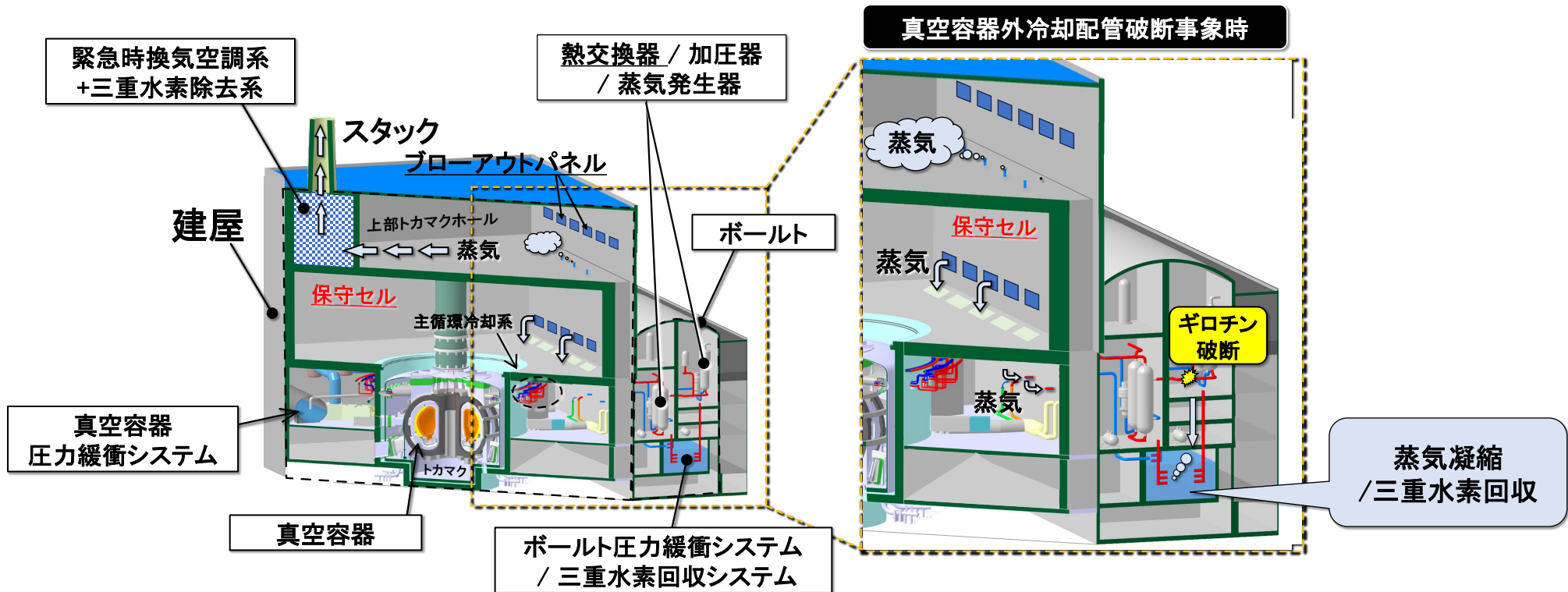
表 原型炉の炉内機器仕様

項目		ブランケット	ダイバータバッフル	ダイバータターゲット	リミター
保水量	m ³	859.3	143.3	113.4	55.8
圧力	MPa	15.5	15.5	5.0	15.5
温度	°C	325	325	200	325



ブランケット主冷却配管で極端なギロチン破断を想定した場合の冷却水漏洩事象時の影響度分析

- ✓ 圧力緩衝システムで加圧水蒸気の凝縮とバブリング効果による圧力上昇を抑え、三重水素を回収。
- ✓ 建屋のブローアウトパネルは開放せず、緊急時換気空調系は作動せずに終息。



基本機能	原型炉の安全上の特徴
止まる	<ul style="list-style-type: none"> 核融合反応の特性上、運転は受動的に止まる。
冷やす	<p>運転停止後の異常事象:⑥残留熱影響</p> <ul style="list-style-type: none"> 緩やかな残留熱の入熱により、徐々に真空容器が昇温されるが、残留熱除去系を介した自然対流で、構造材温度を維持し健全性を確保できる。
閉じ込める	<p>冷却水漏洩事象:⑤加圧水影響</p> <p>技術的に極端な事象を想定しても</p> <ul style="list-style-type: none"> 真空容器内冷却水漏洩時に対し、静的システムで閉じ込められる。 真空容器外冷却水漏洩時に対し、静的システムで環境影響を十分に低く抑えられる。 <p>増殖ブランケットでの異常事象:⑧増殖ブランケット事象</p> <p>技術的に極端な事象を想定しても</p> <ul style="list-style-type: none"> 筐体内冷却水漏洩事象に対し、耐圧性を有する筐体設計で閉じ込められる。 中性子増倍材として装荷するベリリウムと高温蒸気との反応で発生する水素発生量を低減するためにベリライド(純Beの1/100~1/1000程度減少)を採用し、ブランケット筐体内冷却水漏洩時の水素爆発を回避できる。

核融合原型炉を対象に閉じ込め障壁に及ぼす影響度を把握するために、技術的に極端な状況を想定した事象解析を実施し、安全上の特徴を確認

- 外乱や異常に対して核融合反応は受動的に止まり、緩やかな残留熱からの入熱は冷え、圧力緩衝システムによって各閉じ込め領域の機能が保たれ、放射性物質の環境漏えいを十分に低く抑えられる。

【得られた特徴】

- 核融合固有の安全上の特徴から基本的にはITERと同様の安全上の施策を講じることで安全確保が可能。
- 原型炉に特有な増殖ブランケットに起因した事象に対しても、運転上必要な機能と技術的に極端な事象を想定した施策により影響を緩和できる。

ご清聴ありがとうございました