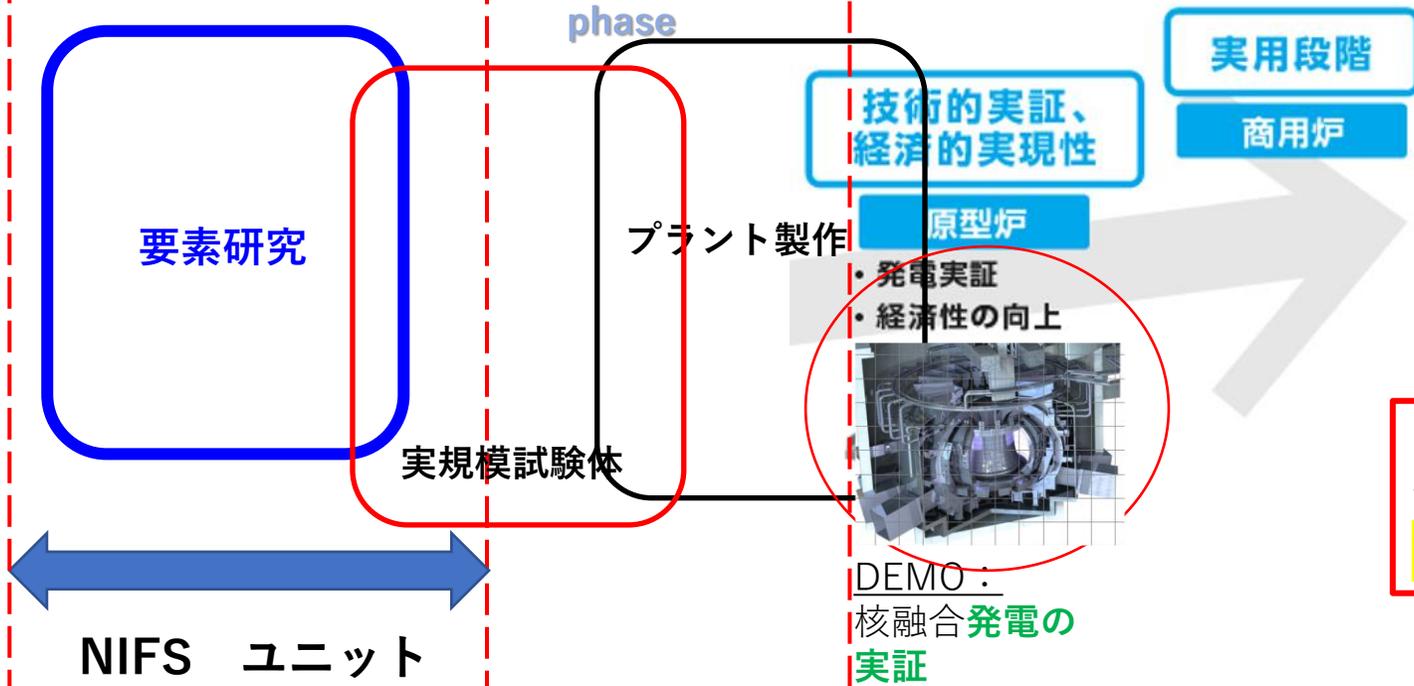


原型炉における固有安全性を有する予測制御法

Model predictive control techniques with the inherent safety
in fusion DEMO

核融合原型炉に向けた動向



- 今世紀中葉に、各種原型炉の運転スタートが計画されている

- 本ユニット提案では、装置全体の設計ではなく、原型炉に関する一部要素技術を取り扱う。その上で、世界的な原型炉促進へ寄与する

- 各種形式（トカマク、ヘリカル、レーザー）を包含する

原型炉設計/制作に向けて、今からの10年間は要素研究で重要な期間。

何の研究か？

原型炉を安全に制御しつつ運用するために必要なことは何か？

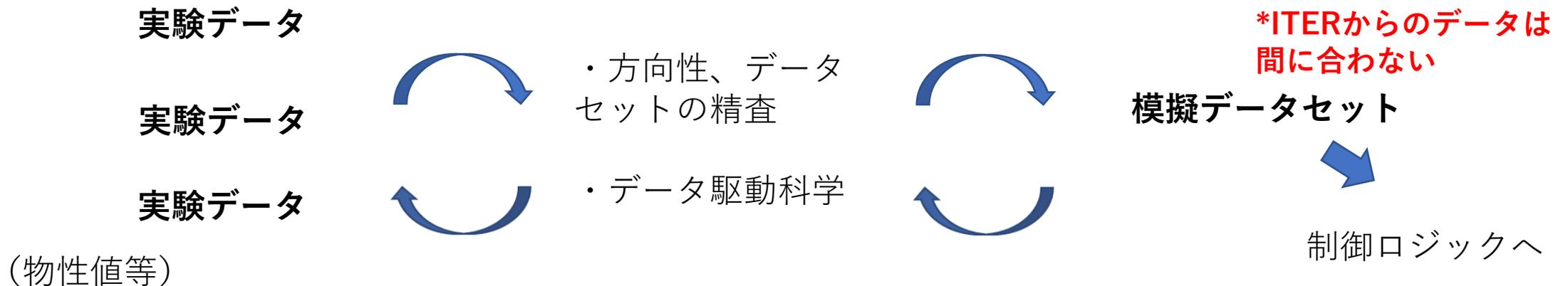
- 核融合原型炉は大規模・複雑系（異なる階層を有する）装置である。核融合プラズマ挙動には、非線形現象が含まれる。原型炉に必要な基礎研究として、磁場閉じ込めとレーザー核融合の共有項目は多い
 - このような装置に対する予測制御手法の構築
- 核融合発電が実現した際に、速やかに社会が利用するための社会基盤整備の一つとして、社会受容性向上および高効率なエネルギー利用

4つのアプローチを軸にした研究提案とした

- 1) 原型炉の予測制御に必要な基礎物性データの取得とデータ駆動
- 2) 燃料トリチウムの高効率および安全利用
- 3) 原型炉に適応可能な予測制御法の構築
- 4) 核融合発電・実用化時のハイブリットシステムの検討

アプローチ1：原型炉の予測制御に必要な基礎物性データの取得とデータ駆動

- 原型炉で使用される材料やガス種は、ITERもしくはそれ以前の装置と比べて限定的。一方で、例えばトリチウム透過影響等はプラズマ真空容器から冷却媒体に至るまで広い領域に対する評価が必要。
- 装置全体を見通した制御に必要なデータの選定と、そのデータ取得のための実験を行う。これまでの工学研究プロジェクト等の経験も踏まえ、**実験データの取得は主に共同研究**にて、国内外の**既存装置の利用**を想定
- このデータを用いて、原型炉運用を想定した制御ロジックを構築するための「**模擬データセット**」を作成する際にはデータ駆動科学を用いる。



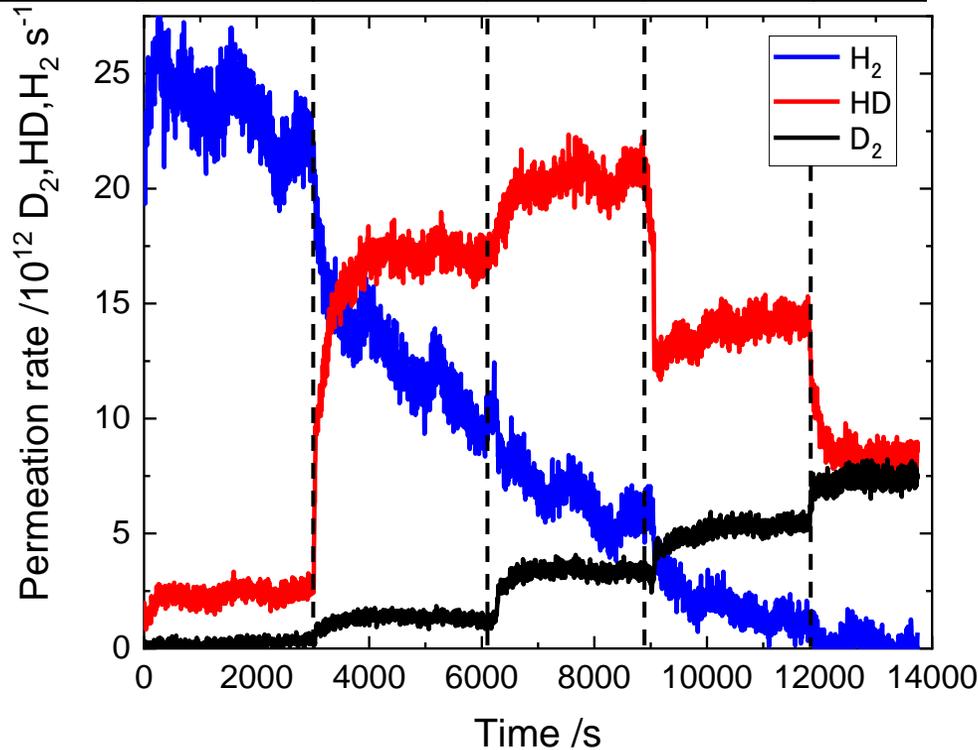
アプローチ1：原型炉に向けた基礎物性データの取得の事例

➤ タングステン材に対し、水素－重水素混合プラズマによる透過特性を研究

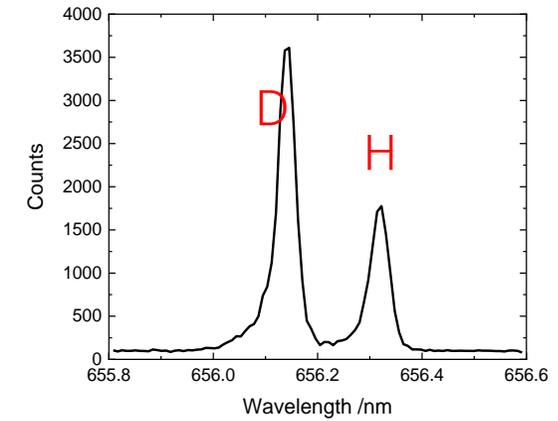
➤➤ 原型炉壁を想定した実験

833 K

H (%)	100	75	50	25	0
D (%)	0	25	50	75	100



プラズマ中で、分光法による同位体比を測定



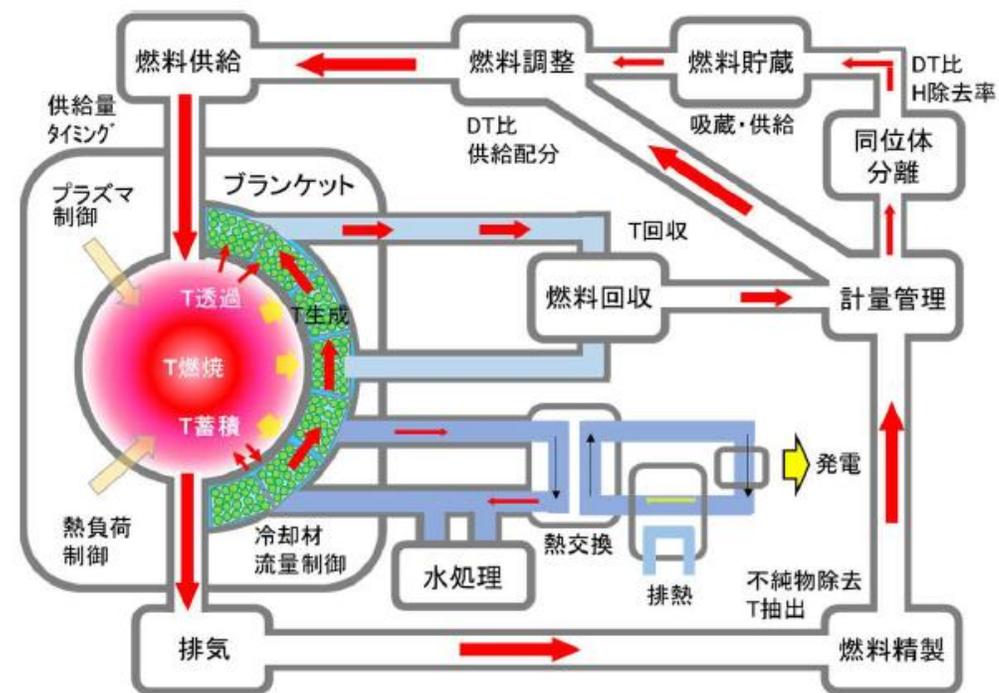
一例として、循環系でも
・コンダクタンスの違い
・減衰過程の違い
等を想定した、水素同位体混合ガスによる研究は必要

H/D比を変化させることで、透過挙動が変化する。
HDの生成はH/Dイオン比に大きく影響する。

アプローチ2：燃料トリチウムの高効率および安全利用

原型炉では燃料トリチウムの初期装荷量を低く抑えるため、高精製トリチウム利用量を低く抑え、重水素—トリチウム混合ガスを循環すること（ダイレクト・リサイクリングパス）が提案されている。トリチウムの安全管理および損失軽減のため、これらは閉鎖系での循環になるので、閉鎖系での水素同位体ガスの長期運用を想定した基礎実験を行う。ここでは、いくつかの阻害因子（不純物除去、同位体分離および蓄積を想定）を加味した水素同位体混合ガス循環に関する実験、およびそれをベースにした流量およびガス種比のモニターを想定した検知場所の選定と流量調整制御に関する研究を行う。

- 一例として水素同位体を挙げたが、この概念は他のガス種や液体等に対しても応用が可能
- 他の冷却媒体、ガスと材料の組み合わせに関する研究を含む。
- 制御システムの最適化を行うことで、原型炉の高効率運転と安全性向上につなげる。



アプローチ3：原型炉に適応可能な予測制御法の構築

・原型炉に適応可能な予測制御法の構築

大型複雑系システム動作にはモデル予測制御の概念が必須である。プラズマ運転と燃料サイクル、冷却循環等の連結を想定し、少ないアクチュエータでの炉心プラズマ制御+周辺機器運用を想定した制御ロジックを構築する。ユニット後期には、この制御ロジックを燃料循環などの機器と接続した性能評価を行う。（模擬データセット）

通常運転時だけでなく、非常時の制御シナリオも同等に扱う >>**安全性の向上**

核融合原型炉での「固有安全」とは何か？ 自明ではない

1) 通常

2) 非常時+商用電源可

3) 非常時+商用電源無、バックアップ電源可

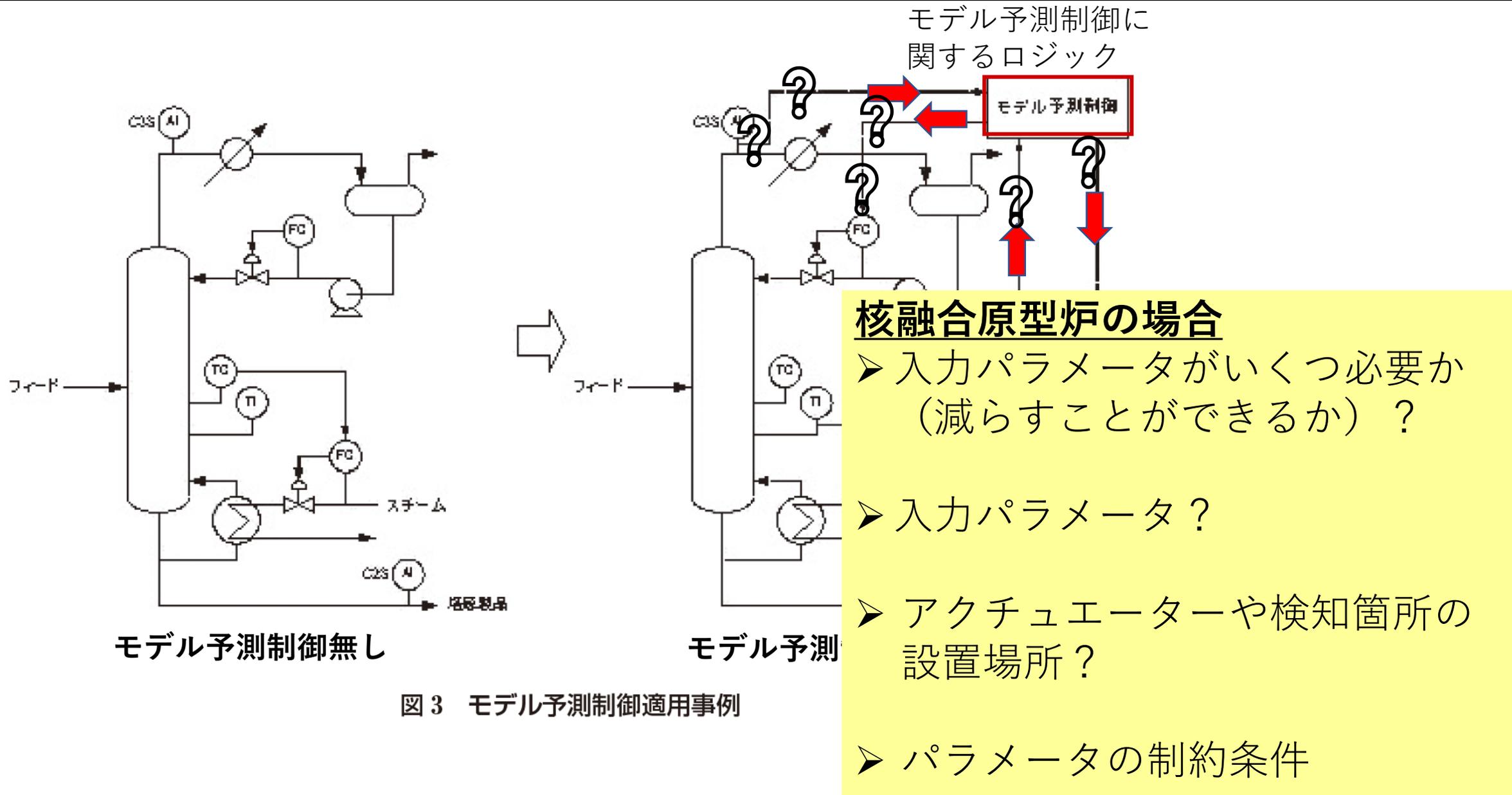
4) 非常時+商用電源無（固有安全考慮あり）

5) 非常時+商用電源無（固有安全考慮無し）

商用電源喪失による影響はブランケット周辺部の冷却不足による温度上昇を想定

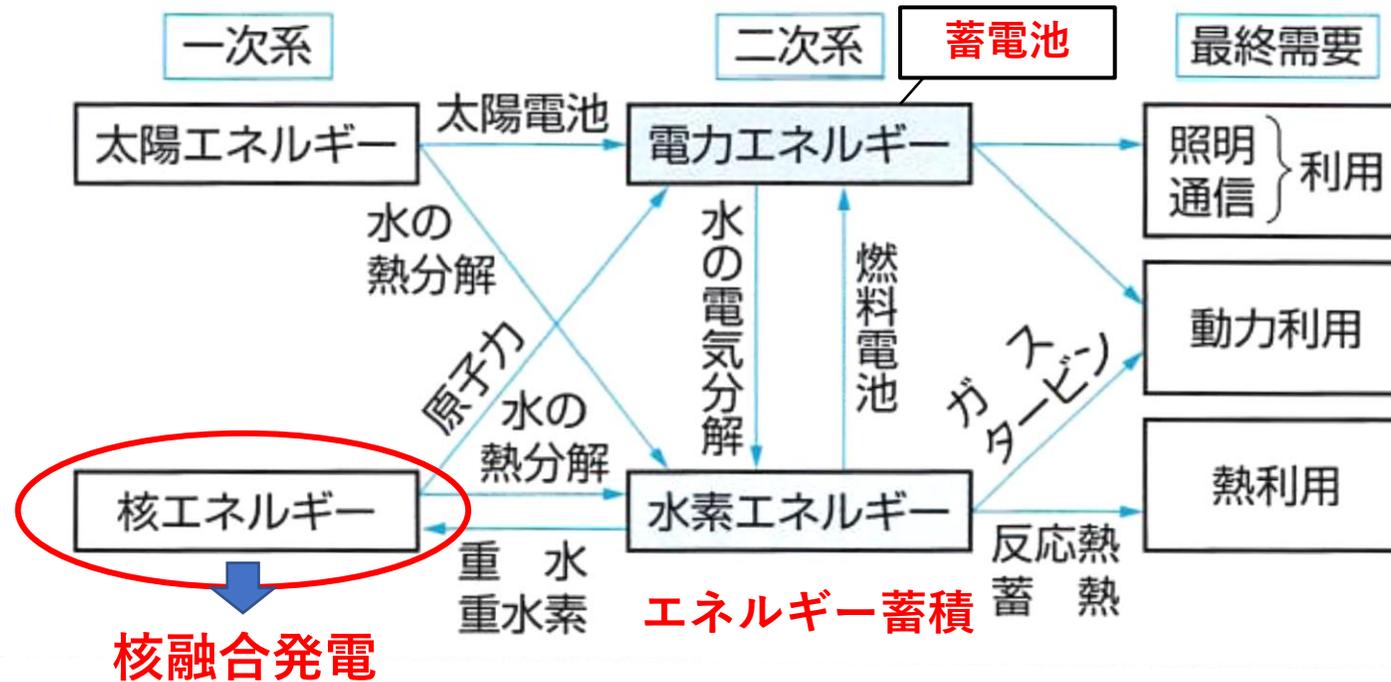
原型炉に対する区分は不明瞭

アプローチ3：核融合に向けたモデル予測制御に関する研究



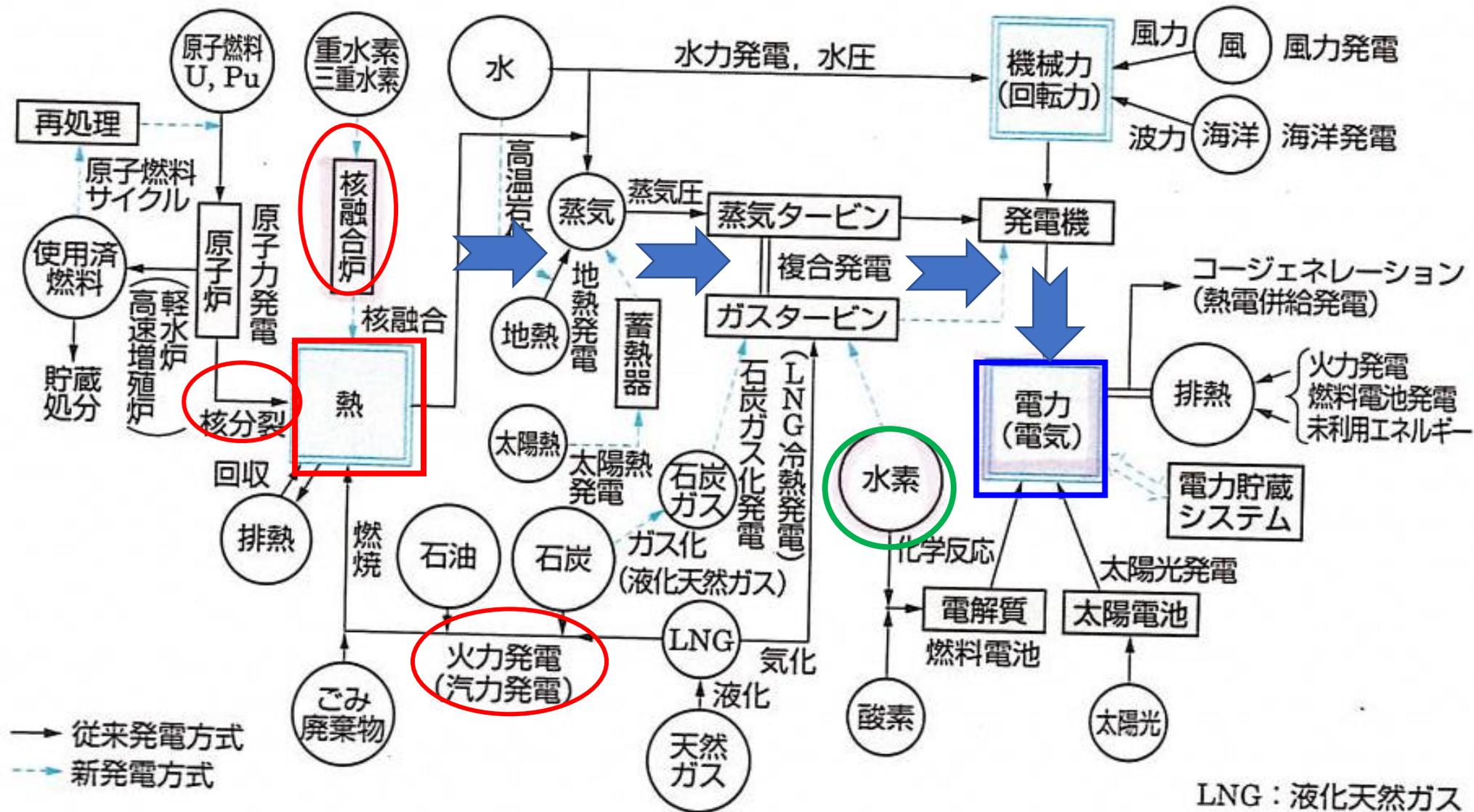
アプローチ4:核融合発電・実用化時のハイブリットシステムの検討

カーボンニュートラルへの寄与を前提とした高効率発電が必須



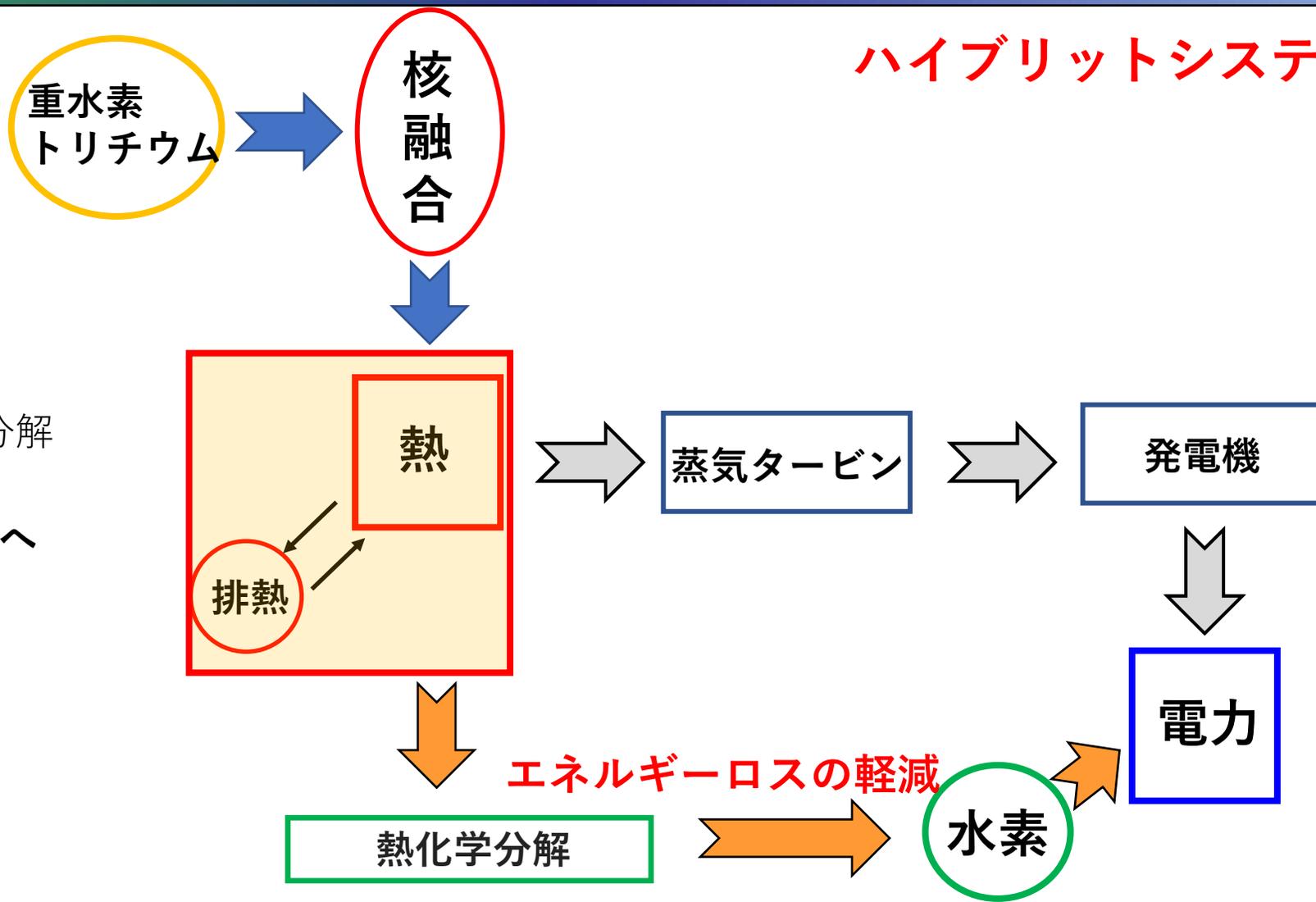
- **核融合発電が1次エネルギー**に速やかに組み込まれるよう、電力需給調整力の検討
- **排熱の有効活用**を目指し、備蓄エネルギーとしての水素製造を想定した熱取り出しに関する基礎研究、およびプラント周辺での**ハイブリットシステム設置**
 - ✓ 商用電源遮断時のバックアップ電源としての機能を有するシステム構築
- **社会受容性の向上**につながる学術的データ提示

電力エネルギーへの変換（従来方式をベースに）



核融合発電を軸にした、新たな電力、水素、熱エネルギー利用

ハイブリッドシステム



核融合：広い温度領域

- ・ 複数の触媒・熱化学分解を利用可能
- ・ 第2世代以降の原型炉への適応

銅-塩素サイクル、ヨウ素-硫黄系サイクル等

- ・ エネルギー蓄積
- ・ 非常時のバックアップ電源

学際的展開

- 1) 原型炉に必要な数値パラメータ取得に関する研究
得られたデータから「模擬データセット」作成のため、**データ駆動科学**を用いる
- 2) 水素同位体・混合ガス循環に関する基礎実験、
循環・揺らぎ・阻害因子としたモデル化
閉鎖系循環運用の実用化に関する指針
- 3) 原型炉に対する**モデル予測制御法**利用の提示、およびそれに必要なロジックの精査およびパラメーター選定を経て基礎実験装置を使った模擬運転の実施
 - 非線形挙動を有する**大型複雑系**システム動作に**モデル予測制御を応用できるのか**、に対する解
 - エネルギー利得の向上 => **持続可能な社会への貢献**
- 4) **複合エネルギー利用**を前提とした核融合発電の運用。水素としての余剰エネルギーの備蓄、原型炉非常時のバックアップ電源（エネルギー）としての利用。
 - >> **安全性および社会受容性の向上**

他分野との協力の可能性

異なる階層を有する大規模システム制御の事例：月・火星居住（閉鎖系での循環システム）
国際宇宙ステーションを含む宇宙居住は必要資源の補充が前提に対し、火星への移動および居住計画では、さらに高度な資源循環系が必要となる。持続可能な社会での資源の有効活用にも寄与

独自性、優位性

- 核融合炉工学に関する分野は幅広い所外共同研究者による協力及び研究成果に支えられてきた。本ユニットはこれら共同研究者に対するゲートウェイとして機能し、本分野での共同研究者の円滑な研究遂行に寄与する。
- この機能は、核融合研究と無関係であった分野との新たな協力体制や、本ユニット研究で必要となる国内外の専門性の高い研究施設利用や国際共同研究に対しても機能的に働く。
- 本研究は工学・プラズマ物理のみならず、社会受容性の向上までを研究の対象とする独自性を有する。得られた成果を他の原型炉設計チームへ提供することで、世界的な核融合原型炉開発促進に寄与する。

関連するユニット: 計測・データ、低温学、材料学、ダイナミクス・時空など