

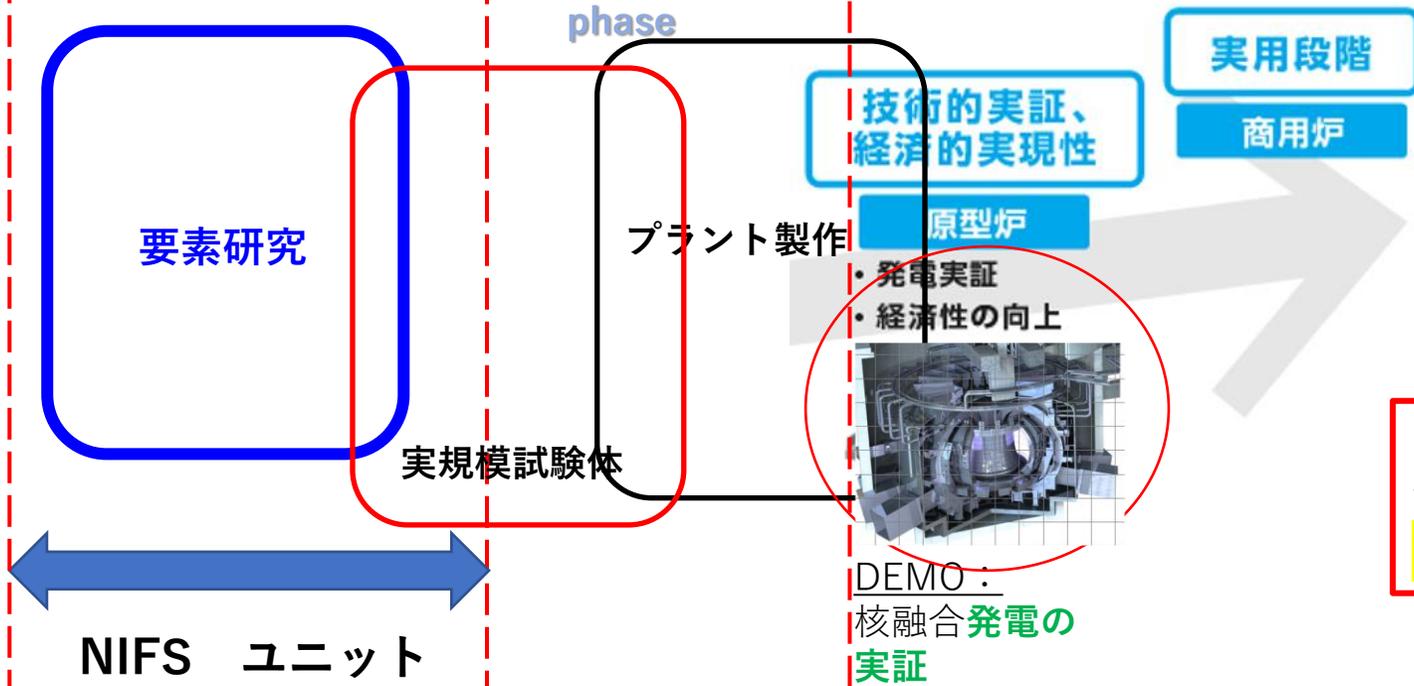
軸：核融合炉システム

原型炉における固有安全性を有する予測制御法（仮称）

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？

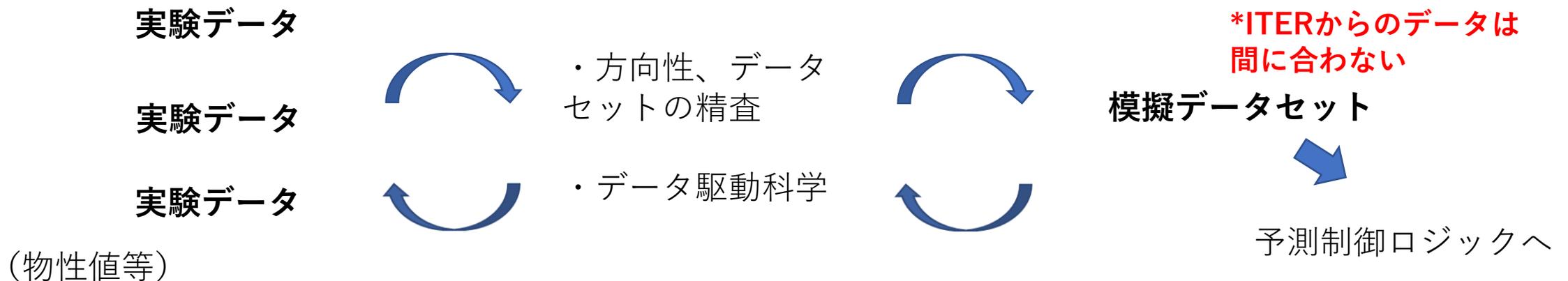
- ▶ 核融合原型炉は大規模・複雑系（異なる階層を有する）装置である。核融合プラズマ挙動には、非線形現象が含まれる。原型炉に必要な基礎研究として、磁場閉じ込めとレーザー核融合の共有項目は多い
 - ▶ 原型炉（各種形式）を想定した物性パラメータ取得、利用（整備）、予測制御手法
- ▶ 核融合発電が実現した際に、速やかに社会が利用するための社会基盤整備の一つとして、安全性の向上と高効率なエネルギー利用

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。



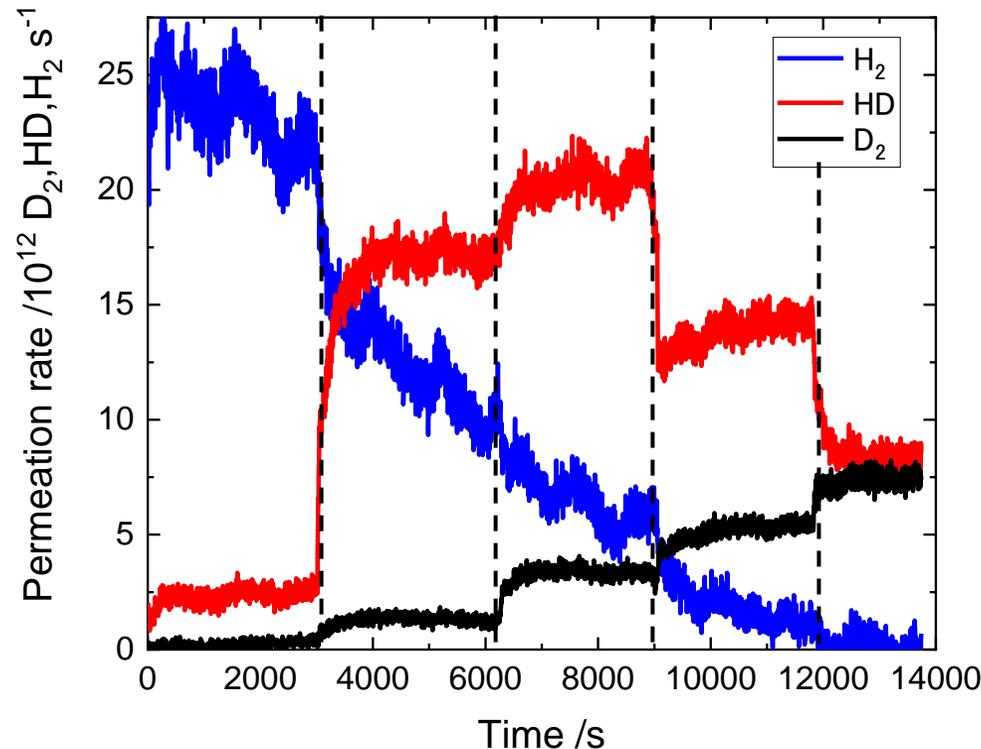
アプローチ1：原型炉に向けた基礎物性データの取得の事例

➤ 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現象**の研究

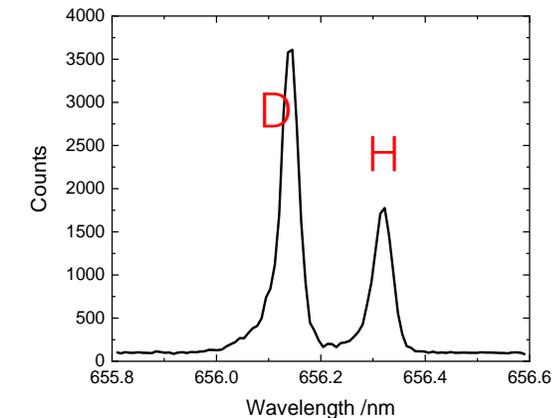
➤➤ 原型炉壁を想定した実験

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

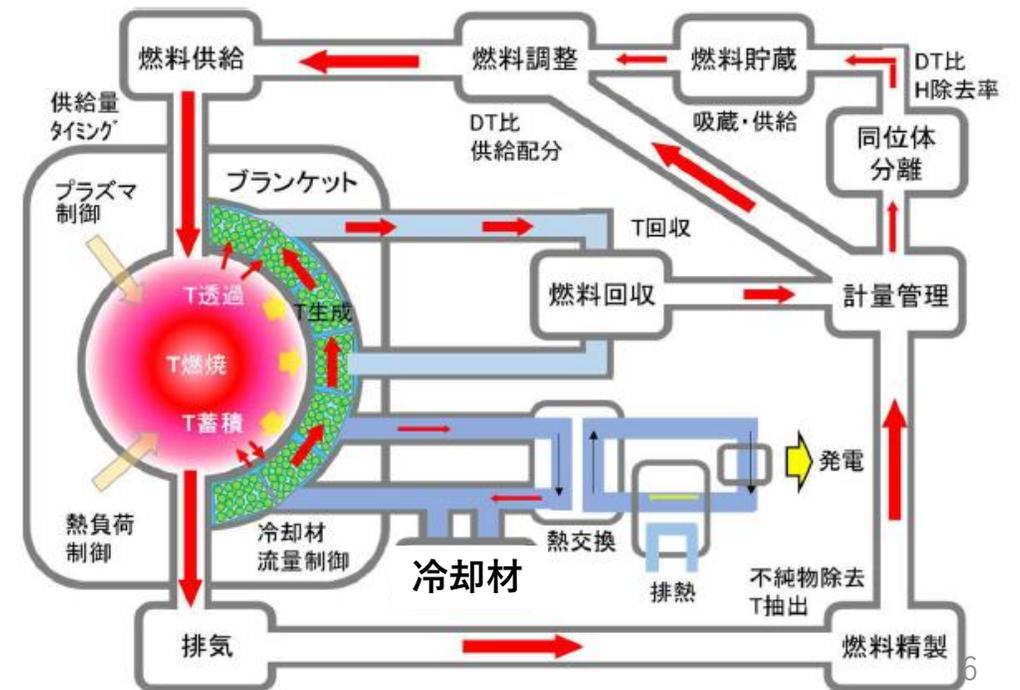
原型炉: 水素同位体(+He)混合で使用する状況が多い。履歴の影響、非対象等、実験で新たにわかる点は未だに多い

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。トリチウムの安全管理および損失軽減のため、閉鎖系での水素同位体ガスの長期運用を想定した（能動的）基礎実験。水素同位体混合ガス循環に関する実験、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基礎研究。

モデルのシンプル化を想定し、阻害因子（不純物除去、同位体分離、蓄積を想定）を加味した循環モデル

- 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。

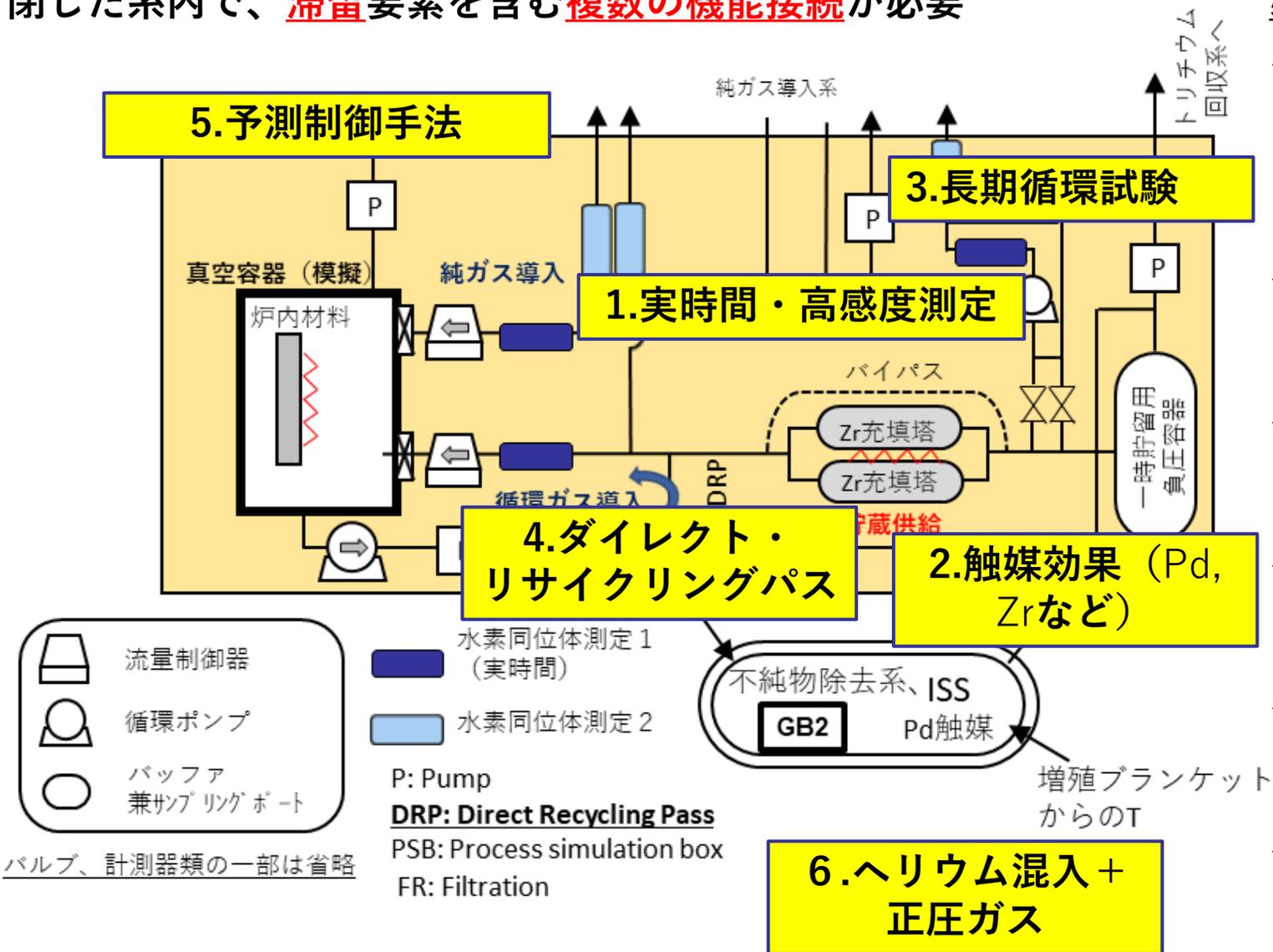


例：実験室規模で、DRP機能を含む基本要素研究が必要

閉じた系内で、**滞留要素**を含む**複数の機能接続**が必要

必要な研究要素

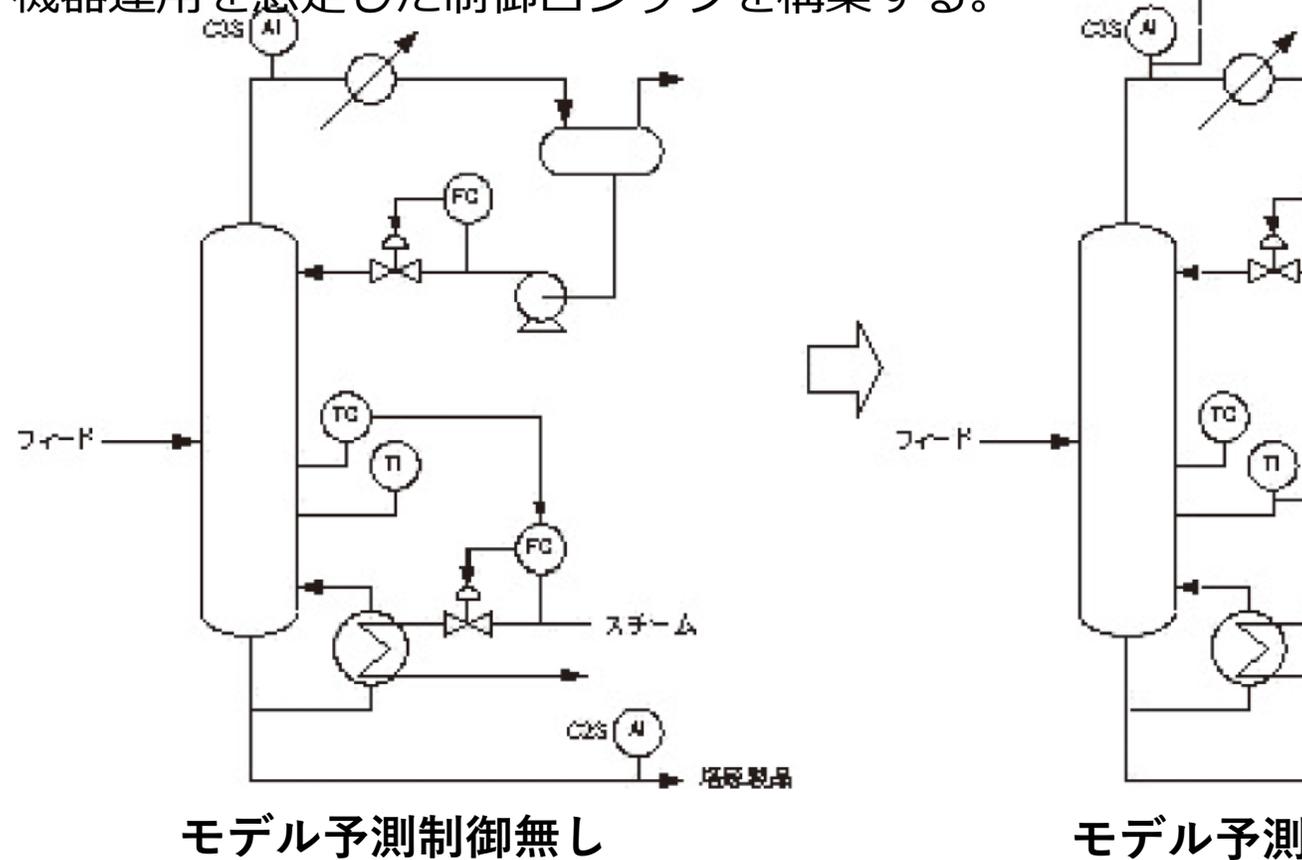
- ✓ 水素同位体比（トリチウムを含む）の実時間測定、高感度測定
現装置とは異なり、供給系で比率制御（例：ラマン分光）
- ✓ 不純物除去/同位体分離での触媒（Zr, Pdなど）効果
- ✓ 長期循環系によるD、T量変化（減衰過程が異なる）**透過防止膜の検証**
- ✓ **ダイレクト・リサイクリングパス（DRP）の検証**
- ✓ 予測制御手法の検討、モデル化、ロジック構築 **概念は、原型炉全体にも応用可能**
- ✓ 増殖ブランケットからの正圧ガス流入への対応



設計検討の前に必要となる、基礎研究案（磁場閉じ込め、レーザー双方を想定）

アプローチ3：原型炉に向けたモデル予測制御に関する研究

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。



モデル予測制御に関するロジック

モデル予測制御

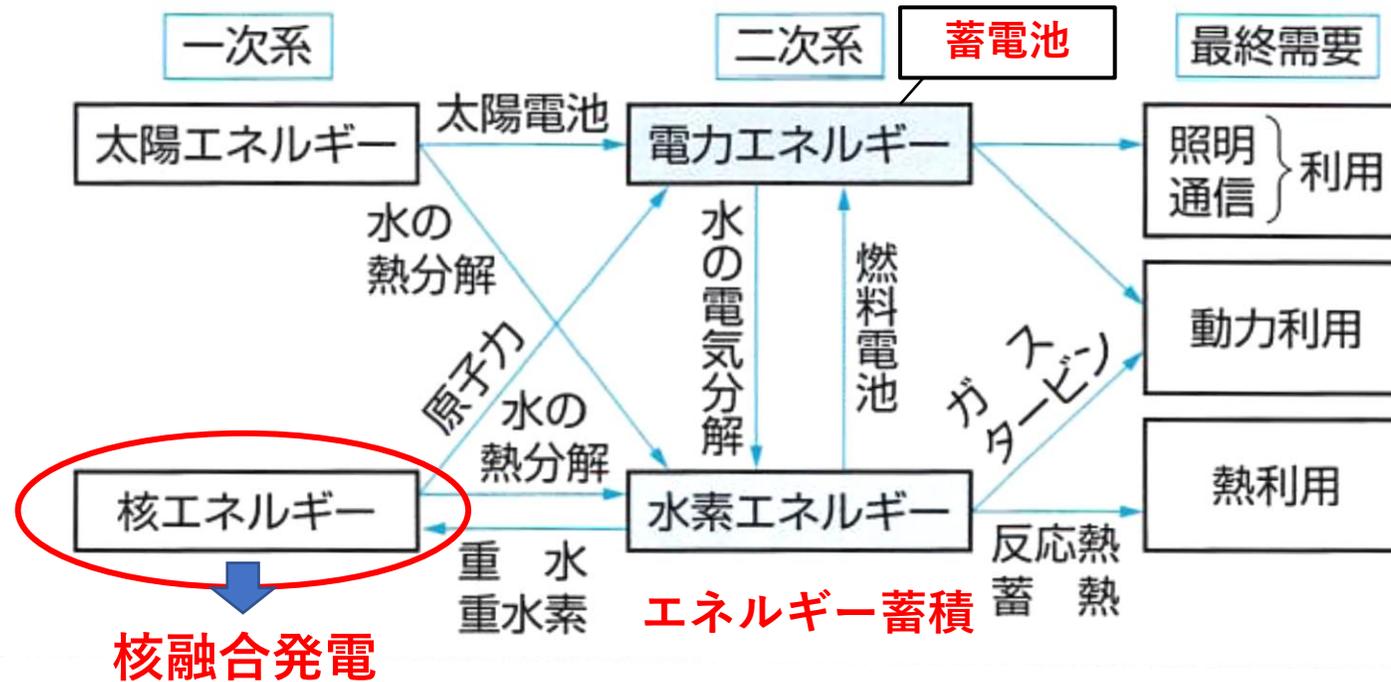
核融合原型炉の場合

- 入力パラメータがいくつ必要か (減らすことができるか)
- 入力パラメータ選定
- アクチュエーターや検知箇所の設置場所
- パラメータ拘束条件

制御への拘束条件 => 安全 (稲垣談)

アプローチ4:核融合発電・実用化時のハイブリッドシステムの検討

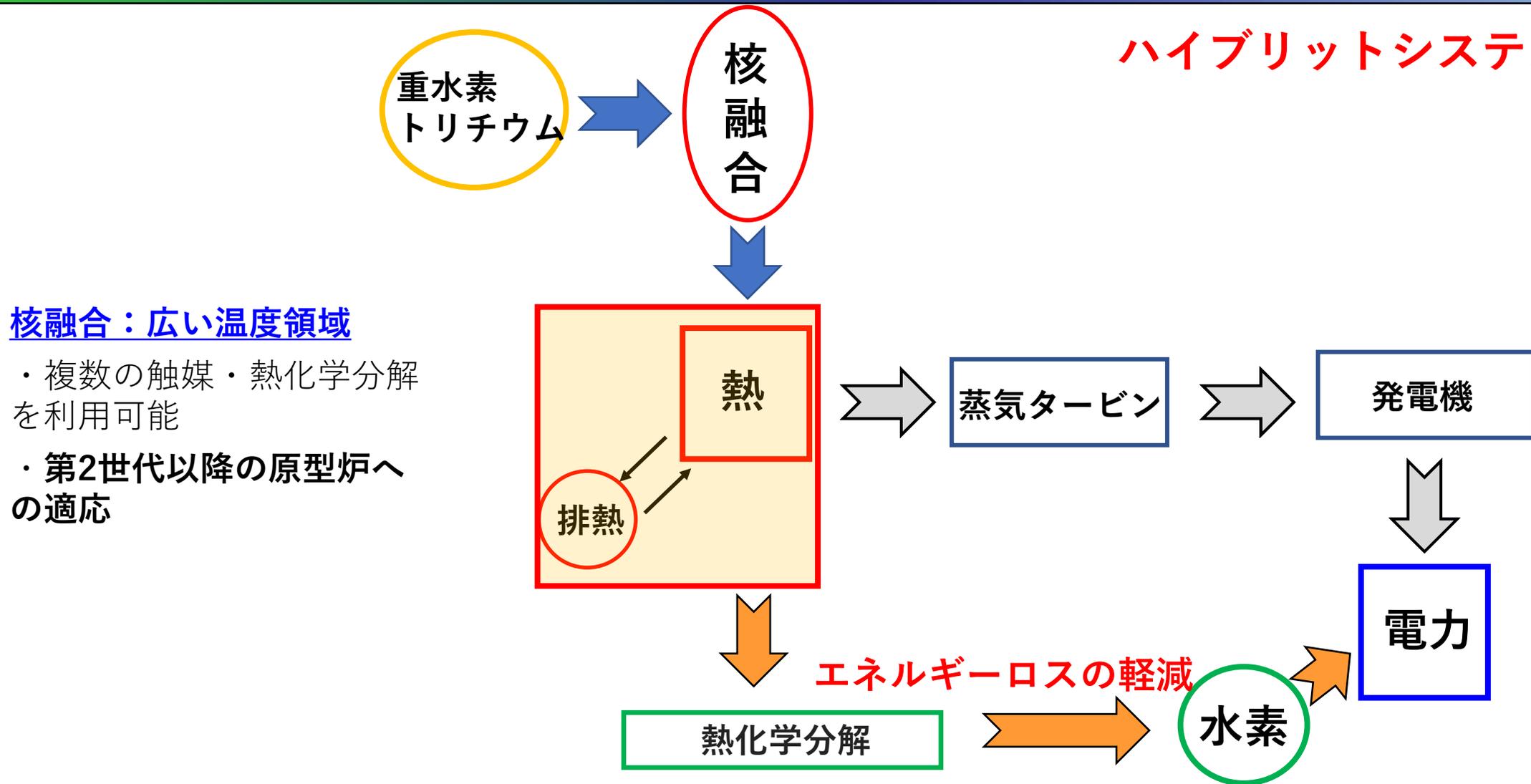
カーボンニュートラルへの寄与を前提とした高効率発電が必須



- **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**ハイブリッドシステム設置**
 - ✓ 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

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**取得に関する実験研究

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

・ 水素同位体挙動

水素同位体置換に伴うトリチウム軽減、除染など

トリチウム排気（ポンプ）に関する基礎実験（京大）

水素同位体プラズマ透過（静大）、および透過防護膜

・ 液体金属・溶融塩

冷却材、ダイバータ壁としての液体金属および溶融塩を含むに関する基礎実験

（水素との相互作用、腐食劣化の評価および被覆等による防護）

使用方法の設計提案および循環方法（ポンプなど）

2) 水素同位体・混合ガス循環、モニター、制御に関する基礎実験、

循環・揺らぎ・阻害因子のモデル化、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

4) 複合エネルギー利用を前提とした核融合発電の運用。利用環境の整備（環境・生体トリチウムなど）。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、設計最適化

3) + 4) **エネルギー利得の向上** => **持続可能な社会への貢献**

- 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、原型炉装置の周辺に位置（分野、立地）する関連研究まで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。

- ・ 3月2日（水）16:00-18:00 説明会を実施します（ZOOM）

近日中、MLにて案内を配信

- ・ アカデミックプランの精査に向けて、講演会（もしくは意見交換会）を企画します。***ユニットは決めていないが興味がある、という方も参加可能です。**

- **トカマク原型炉概要（原型炉特別チームもしくは坂本宜照）、日程検討中**
- **エネルギー総合工学研究所；依頼中**
- **（未調整：レーザー核融合戦略会議報告書の概要）**

迷っている研究者とは、個別に相談