

序論

背景

地球規模でのエネルギー環境問題の解決に向けて、D-T核融合炉が次世代エネルギー源として期待されている。我が国のエネルギー基本計画でも、核融合炉は「革新技術」として位置づけられ、2050年のCN達成に向けて、大きな期待が寄せられている。そして現在、核融合エネルギーでの発電を実証するため原型炉活動が盛んになっている。

課題

核融合原型炉では、水素の放射性同位体であるトリチウム (T) 燃料を大量に生産・消費・管理・運用 (図1参照) し、施設内にTを閉じ込めなければならない。Tを安全に管理・制御するためには、以下のT移行挙動の理解を深める必要がある。

1. Li_2TiO_3 からのT放出挙動

挙動はパージガス中のH濃度、Oポテンシャル、Li蒸発量等により大きく変化。また、ブランケットから冷却水へのT透過量や燃料サイクル自体の成立性も放出化学形 (HTO, HT) に大きく影響を受ける。

2. 高温高压冷却水間でのT透過挙動

挙動はT分圧、温度、Oポテンシャル、金属壁厚みと表面状態等により大きく変化。

3. システム間のT移行挙動

挙動は各システムでのT流入量、処理量、損失量のマスバランスにより大きく変化。

目的

課題3について、最新のDRL案を組み込んだT燃料サイクル間におけるT移行挙動シミュレータを作成し、システム全体でのTマスバランスを示す。

(今後、同時進行中の課題1,2の研究結果をT移行挙動シミュレータに反映する予定。本発表では課題3についてのみ言及。)

T燃料サイクルモデル

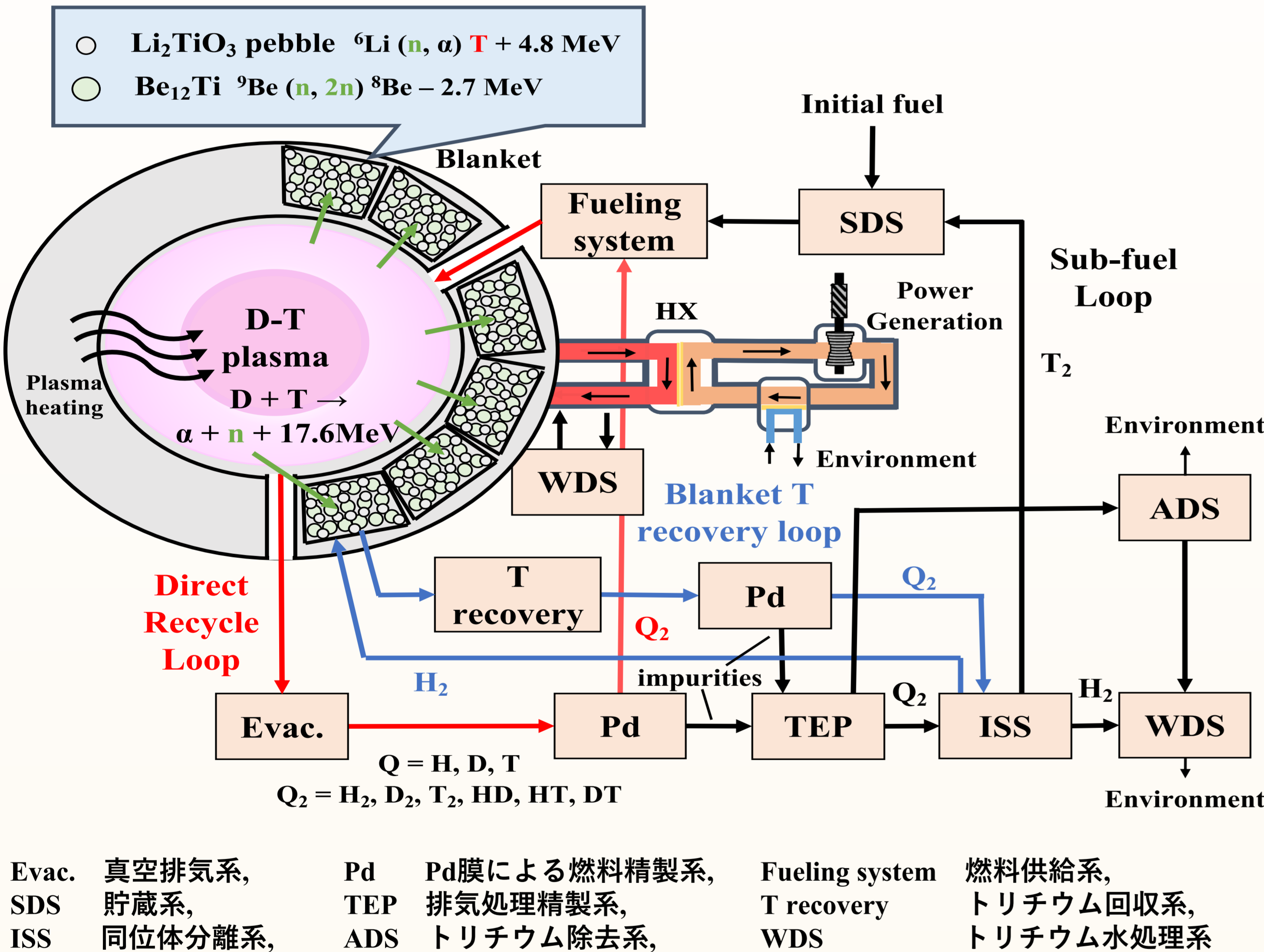


図1. 原型炉におけるT燃料サイクル概略図^[1,2]

Blanket T Recovery Loop

D-T反応で生成した中性子が Li_2TiO_3 と核反応を起こすことで、自然界に多く存在しないTを水素ガス状(HT)または水蒸気ガス状(HTO)で生成する。そのTを H_2 添加パージガスで回収し、Pd膜によりHTをISSにて、 T_2 , H_2 に精製し、精製された H_2 をパージガスとして再利用するサイクル

Direct Recycle Loop

未反応燃料を炉心から真空排気(Evac.)し、Pd膜により Q_2 を分離回収し、燃料として再供給するサイクル

Sub-fuel Loop

TEPにて、Tを微量に含む Q_2 以外の不純物(H_2O , CH_3Q , NH_3Q etc.)を回収し、 Q_2 に精製後、更にISSで T_2 に精製し、燃料として貯蔵・供給するサイクルと
ADSにて、Tを含む不純物を T_2O 水蒸気に変換し、 H_2O 水に接触させてTを回収する。
WDSにて、ADSで生成したHTO水からTを回収する。

解析方法・手順

1. 原型炉の概念設計^[1]を参考に、T燃料サイクル構成システムを設定 (図1参照)
2. 核融合出力や各システムにおける時定数や処理率を文献値^[2,3,4]を参考に決定
3. 各システムにおけるT収支式を連立一次元微分方程式^[5]として解く

解析結果

1. SDSにおけるT貯蔵量

T貯蔵量の最小値 (消費量 = T生産量となる) を迎えるまでの、消費量を少なくでき、その分だけ初期燃料を減らすことができる。
→ Tリスク低減に寄与

f_{DRL} : TがEvac → Pd → Fuelling system
→ TEPと分岐する際に
Fuelling systemに進む割合

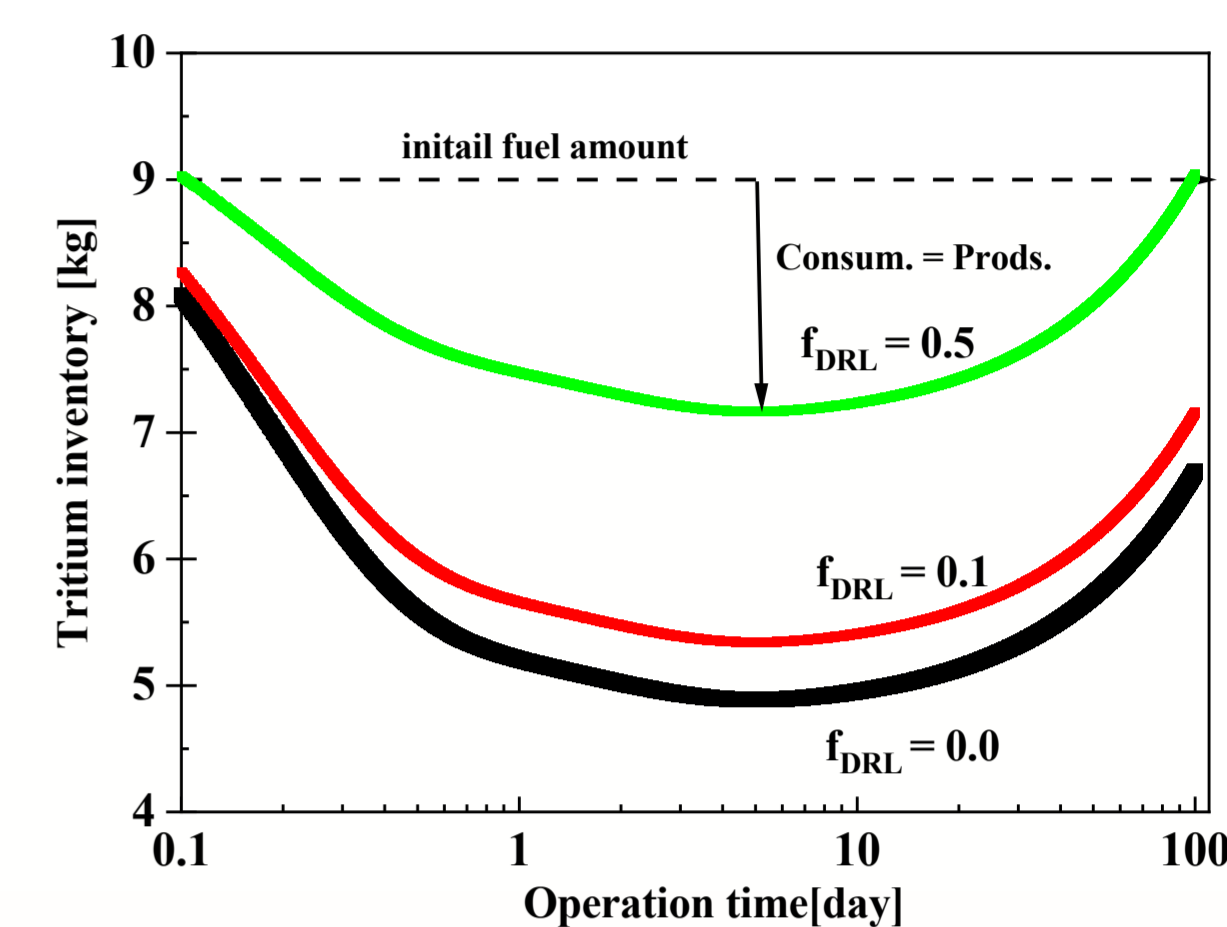


図2 燃料貯蔵系SDSにおけるT量

2. ISSにおけるT量

図3より、ISSにTが局所的に偏在しており、処理量も他システムより突出する。図4より、 f_{DIR} を大きくするとTの分布や処理量共に改善できることを確認した。経済的観点からも、ISSの規模の縮小が要求されており、この点においてもDIR案の高い有効性を確認した。

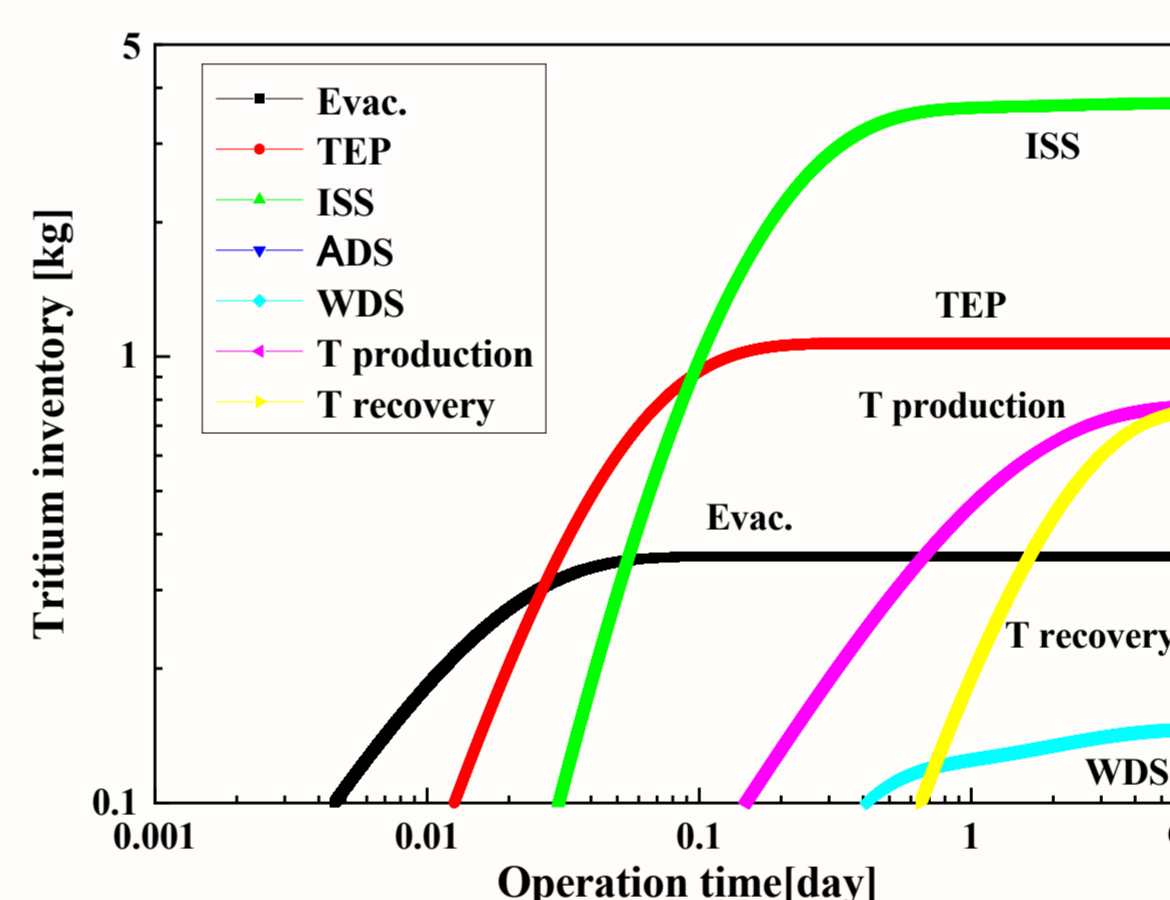


図3 各システムにおけるT量 ($f_{\text{DRL}} = 0$)

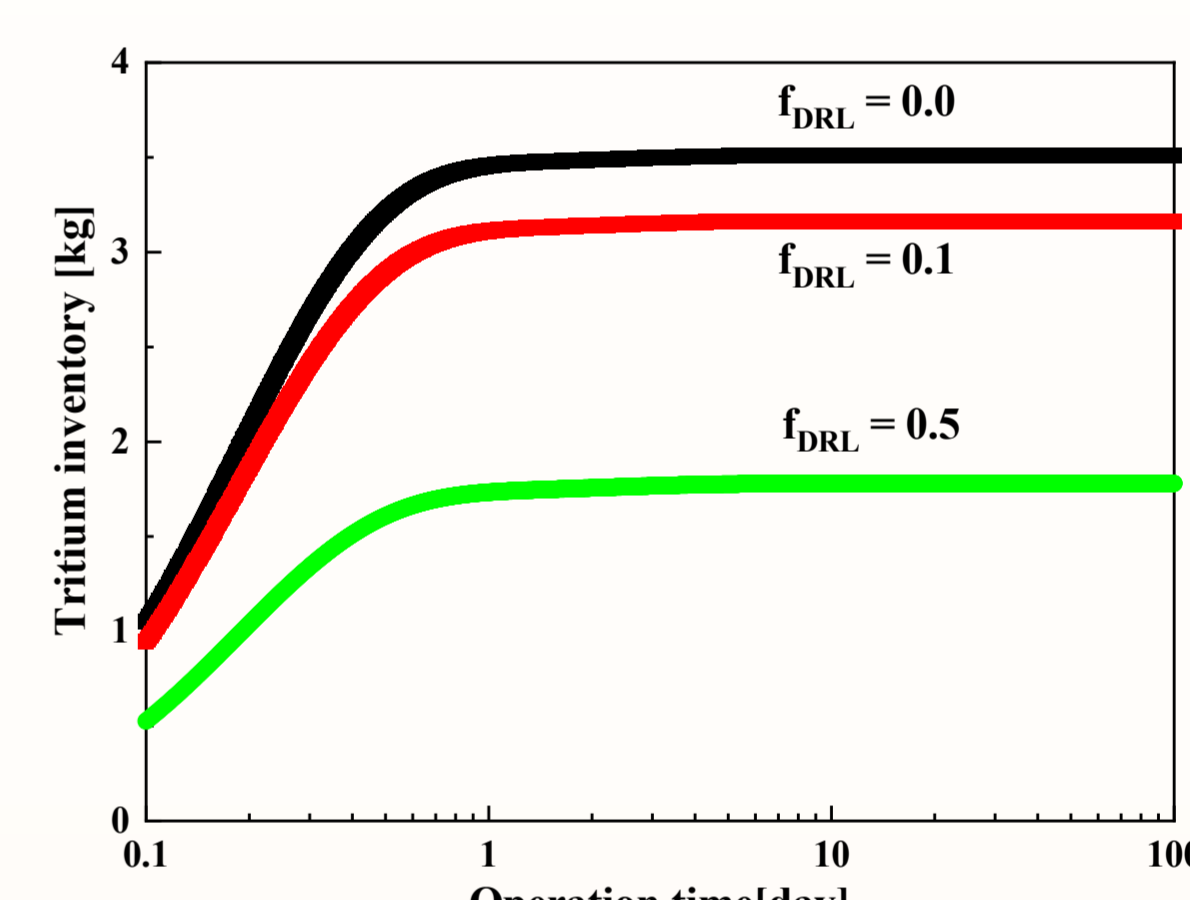


図4 T燃料精製系ISSにおけるT量

最終目標

T移行挙動シミュレータを改良し、最新の原型炉条件(流量、温度、設計要求等)より、T移行量、冷却水中T濃度、発電系のT汚染レベル、復水器でのT環境放出量等々を求め、T安全管理対策を提言することで、原型炉のT安全工学設計 (T透過低減技術評価、配管破断時の安全解析等)へ繋げる。

安全性と持続性が高いT燃料サイクルの実現に大きく寄与できる。

更に、本研究で提示する数字に高い信頼性を確保できれば (特にT環境放出量)、核融合商用炉実現に向けた、社会受容性と安全性の向上に大きく貢献できる。

まとめ

T燃料サイクルモデル自体に多くの改良点 (システムの実装、パラメータの選定、計算精度等)があるのが現状である。一方で、最終目標を達成するための基礎となるコードは着実に前進しており、SDSにおけるT燃料量とISSにおけるT滞留量により、DRL案の有効性を確認できた。

今後は課題1,2の研究結果も盛り込むことで、実験に基づいて明らかにした物理的なT移行モデルに従っている点で、他のシミュレーション研究の結果と差別化できる。

参考文献

1. Y. Iwamoto, et al., Fusion Eng. Des. 166 (2021) 112261
2. Y. Nicolas, et al., Fusion Eng. Des. 136 (2018) 314-318
3. R. Hiwatari, et al., Fusion Eng. Des. 143 (2019) 259-266
4. M. Coleman, et al., Fusion Eng. Des. 141 (2019) 79-90
5. D. Baiquan, et al., Fusion Eng. Des. 55 (2001) 359-364