

核融合炉起動時の燃焼と 水素同位体燃料循環に関する研究

学生証番号 47-186097 氏名 宮前 健人
(指導教員 山田 弘司教授)

Key Words: Nuclear fusion, Tritium, System Dynamics, STELLA

1 序論

核融合発電は燃料資源が豊富で遍在せず、二酸化炭素を排出しない新しい基幹エネルギー源として期待されている。現在考えられている核融合発電では重水素 (D) とトリチウム (T) の核融合反応から得られる中性子のエネルギーを熱に変えて発電するとともに、この中性子とトリチウムの反応を用いて T を増殖させる。T は資源としては実質、自然界に存在せず、核融合炉初号基では重水炉によって生産されたものを初期装荷として利用することが考えられている。核融合炉 1 基の初期 T 装荷量は数 kg であることに對し、利用可能な T は世界で 20kg 程度に留まる。特に我が国では国内で T を自給することは厳しく、核融合炉開発戦略上、T の初期装荷をどう調達するかが重要な課題となっている。

そこで初期炉では T を用いず、D と D の反応を用いて T を生成しつつ、プラズマ内に燃料として入れ徐々に DT 反応の割合を大きくしていき定常状態にするという運転 (DD スタートアップ) が考えられている。この運転の可能性については、笠田らによって原理的な検証はなされている [1] もの、この先行研究では炉心プラズマのモデル等に大きな簡略化がされているため、定量的な評価にはモデルの高度化が必要である。特に、核融合出力や T 蓄積量の蓄積時間は炉の運転計画に大きくかわるため、その正確な評価が求められる。

本研究では、炉心プラズマに関わる最新の知見を用いて重水素燃料のみからの核融合炉起動時の燃焼と水素同位体燃料循環のモデルを構築し、T を用いない起動について考察を進めた。

2 プラズマにおける高度化

2.1 システムダイナミクス

本研究ではシステムダイナミクスの商用ソフト STELLA(ver9.1) を用いて計算を行っている。システムダイナミクスは、ある物量の時間微分方程式をストック&フローの概念で表す手法である。

2.2 エネルギーの時間発展

本研究では核融合反応断面積等の物理量の温度依存性を組み込み、プラズマ内部エネルギー W_p の時間変化を矛盾なく解く。 W_p の時間発展微分方程式は以下である

$$\frac{dW_p}{dt} = P_\alpha + P_{NBI} - P_{rad} - \frac{W_p}{\tau_E}. \quad (1)$$

ここで P_α はアルファ粒子による加熱パワー、 P_{NBI} は中性粒子ビーム入射加熱 (Neutral Beam Injection, NBI) による加熱パワー、 P_{rad} は各種放射損失パワー、そして $\frac{W_p}{\tau_E}$ はエネルギー閉じ込め時間 τ_E による減衰である。プラズマの温度 T は次式より密度 n に合わせて計算している。

$$W_p = \frac{3}{2} V_p (\sum n_i + n_e) (kT). \quad (2)$$

2.3 燃料希釈

本研究ではヘリウム (He) 灰およびアルゴンによる燃料の希釈についても計算している。プラズマ内における He の量は、DT 反応による生成項と拡散・排気による損失項のストック&フローで計算している。

2.4 粒子密度と温度の分布

炉心プラズマ中で粒子密度や温度は小半径方向に分布を持つことが知られている。電子密度と温度についてそれぞれ次式でモデル化を行った [2]。

$$n(\rho) = n_0(1 - \rho^2)^{0.6}, \quad (3)$$

$$T(\rho) = T_0(1 - \rho^2)^{1.5}. \quad (4)$$

ここで n_0 と T_0 は中心における密度及び温度の値を、 ρ は実行半径で規格化した小半径を表している。イオンの密度分布は、He の生成分布と拡散、DT 比、アルゴンの寄与全てを考慮し、電子密度との荷電中性条件を満足するように決めている。

2.5 参照モデルの結果

T の粒子閉じ込め時間をエネルギー閉じ込め時間の 1.5 倍、He の粒子閉じ込め時間を T の 1.5 倍と仮定した場合のイオン密度構成と核融合出力の時間発展を図 1 に示す。

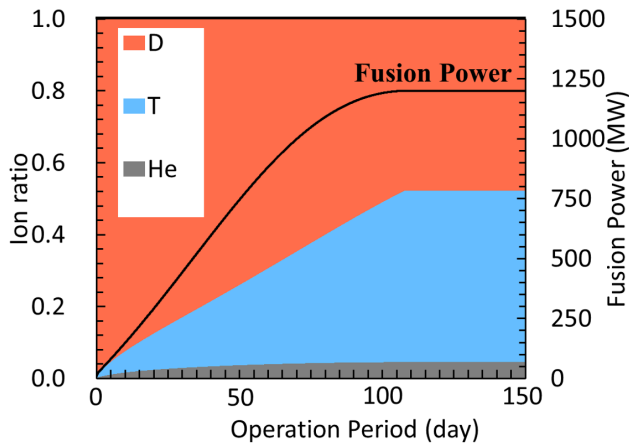


図1: 参照パラメータセットのモデルにおける定常状態までの核燃焼発展. 黒い実線は核融合出力の時間発展を示す. 塗りつぶしはプラズマ内の燃料比を示している. 赤がD, 青がT, 灰色がHeである.

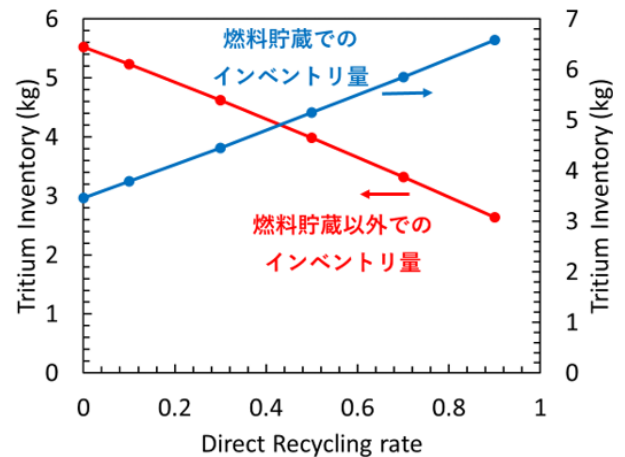


図2: ダイレクトリサイクル率の燃料貯蔵以外のトリチウムインベントリ量 (赤) と燃料貯蔵におけるインベントリ量 (青) への影響.

3 燃料循環システムにおける検討

プラズマモデルの高度化を導入したモデルを用いた, 核融合出力の時間発展と炉内 T インベントリの時間発展についての炉内パラメータの感度分析及び燃料循環システムの新たなモデル化の検討について述べる.

3.1 炉内パラメータ感度

まず, Tritium Breeding Ratio (TBR) の感度分析を行った. TBR を 1.1 から 1.15 まで増加させると定常状態に達するまでの時間が 100 日から 60 日まで短縮されるという結果が得られた. また, 燃料貯蔵におけるインベントリ量に関しても, 運転開始後 500 日の時点で 3.5 kg から 7.5 kg と, 大きく増加するという結果が得られた.

次に, ブランケットにおける閉じ込め時間の感度分析を行った. ブランケットでの閉じ込め時間を現在考えられている 2 日から 1 日に短縮できた場合, 定常状態に到達するまでの時間は約 30 日短縮されるという結果が得られた.

3.2 ダイレクトリサイクルの効果

原型炉では燃料貯蔵以外での T インベントリ量を削減するために, 新しい T フロー概念であるダイレクトリサイクル (DR) の導入が検討されている [3]. DR では, 排気されたガスをバイパスを通してそのまま炉心に供給する. DR の効果を検討するため, 新たに DR というストックを設け, プラズマからの排気を一定割合 DR におけるモデルでの計算を行った.

DR にまわす割合を変化させた場合の, 燃料貯蔵以外のインベントリと燃料貯蔵におけるインベントリへの影響を図 2 に示す. DR 率を大きくするほど, 燃料貯蔵以外における T インベントリ量は減少し, 燃料貯蔵におけるインベントリ量は増加している. また, DR が DD スタートアップでの燃焼発展においても有利であるという結果

が得られた. 例として, DR 率が 70% のモデルでは, 定常状態に達するまでの日数は約 55 日短くなる.

3.3 真空容器壁のトリチウム吸い込みの影響

原型炉では T の真空容器壁への吸着が懸念されている. 真空容器壁への T 吸着の影響を検討するため, 新たに真空容器のストックを設けたモデルでの計算を行った. 本モデルでは, プラズマからの T フローの一定割合を真空容器壁に送り, 真空容器壁からブランケットへ 48 時間の閉じ込め時間で移行させている.

プラズマから排気されたガスが 10% 吸い込まれる場合, 定常状態に達するまでの日数が約 200 日延びるという結果が得られた. 定常状態到達後は, 真空容器壁に約 0.6 kg のインベントリが一定量存在している. また, 17.5% の吸い込みがある場合, 安全上の観点から定められる真空容器壁の限界 T 保有量の 1 kg を超える.

4 結論

本研究では, 先行研究でのプラズマ部分における簡略化された仮定から, 新たにプラズマ部分のモデルの高度化を行うことで, より現実に即し定量的議論に供することができると計算を可能とした. 更にプラズマの高度化だけではなく, 新 T フローモデルを実装することにより, プラズマと炉システム双方の観点から核融合炉内における水素同位体燃料循環に関してパラメータ感度などの特性評価を行った.

参考文献

- [1] R. Kasada, S. Kwon, S. Konishi, Y. Sakamoto, T. Yamanishi, and K. Tobita. *Fusion Engineering and Design*, Vol. 98-99, pp. 1804-1807, 10 2015.
- [2] Y. Sakamoto, M. Nakamura, K. Tobita, H. Utoh, Y. Someya, K. Hoshino, N. Asakura, and S. Tokunaga. *Fusion Engineering and Design*, Vol. 89, pp. 2440-2445, 10 2014.
- [3] C. Day and T. Giegerich. *Fusion Engineering and Design*, Vol. 88, pp. 616-620, 10 2013.