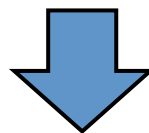


輸送コードを用いたコアプラズマ燃焼 制御に関する研究

Yuya Miyoshi₁, Yuichi Ogawa₁, Makoto Nakamura₂

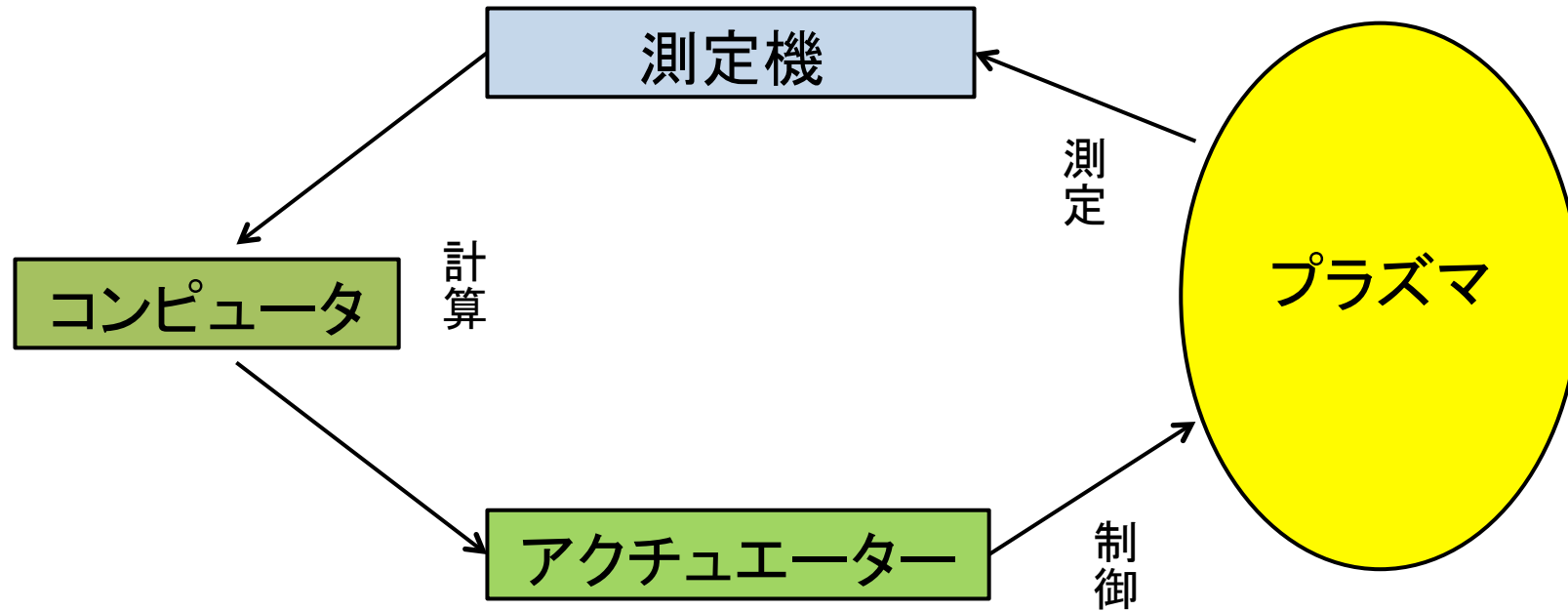
将来の核融合炉制御に要求される事項

- ・ウォールコンディショニング、トリチウム除去
- ・プラズマ位置、形状のコントロール
- ・電流、出力、熱負荷等の動的パラメータコントロール
- ・ELM,NTM等の不安定性コントロール
- ・予期せぬディスラプション時の制御

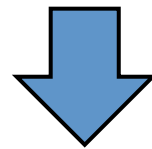


輸送コード単体での燃焼制御シミュレーションを行う

燃焼制御に求められること

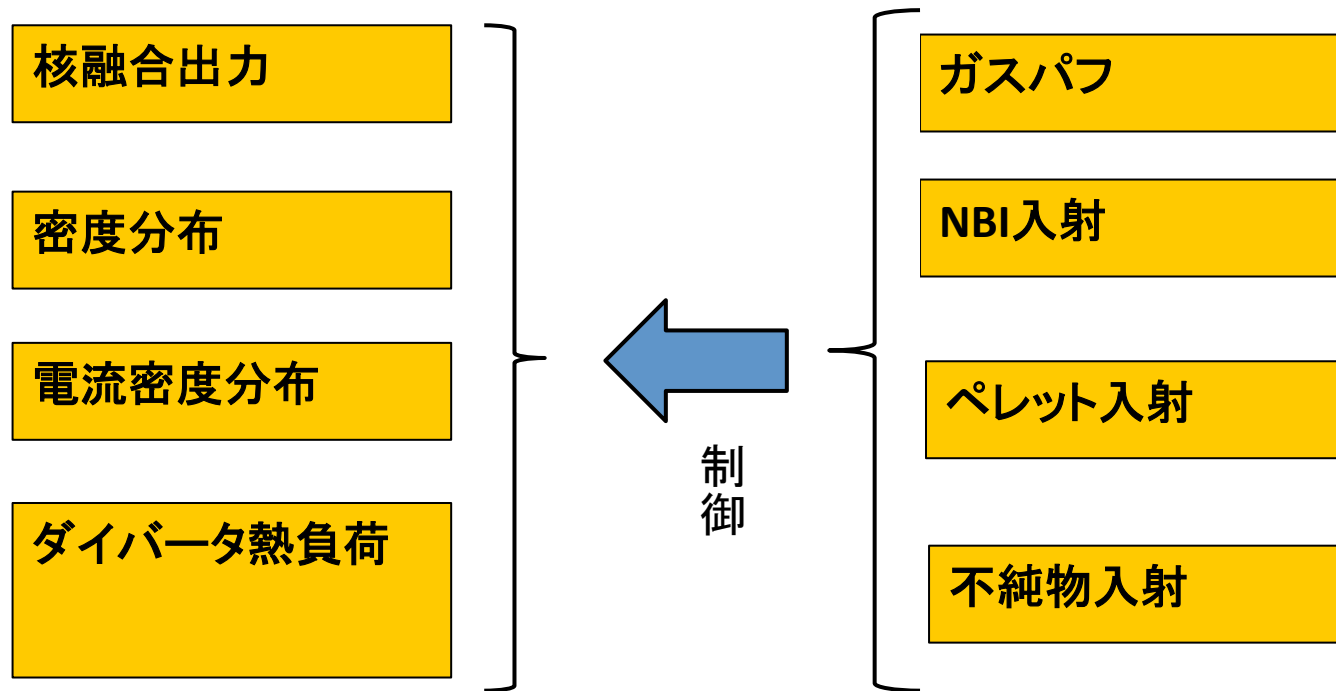


測定、計算、制御を高速で、限られた機器の組み合わせで行う必要がある



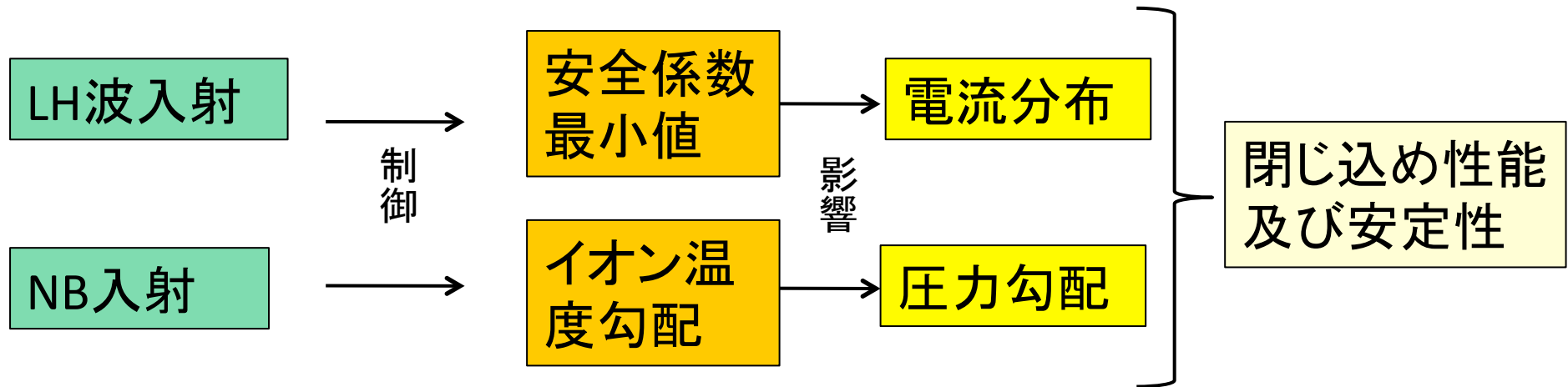
制御ロジックの構築が必要

代表的な被制御量とアクチュエーター



被制御量とアクチュエーターは1:1対応するわけではないので、どのように組み合わせて制御を行うかを吟味する必要がある。

JT-60における複合制御実験



LH波はCD効率が高くイオン加熱小さい。又垂直入射NBはイオン加熱効率が高くCD効率はほとんどない。そのためアクチュエータ同士の干渉はほとんどなかったとされている。



将来の核融合炉においてはアクチュエータ同士の干渉も考慮に入れた制御が必要となる。

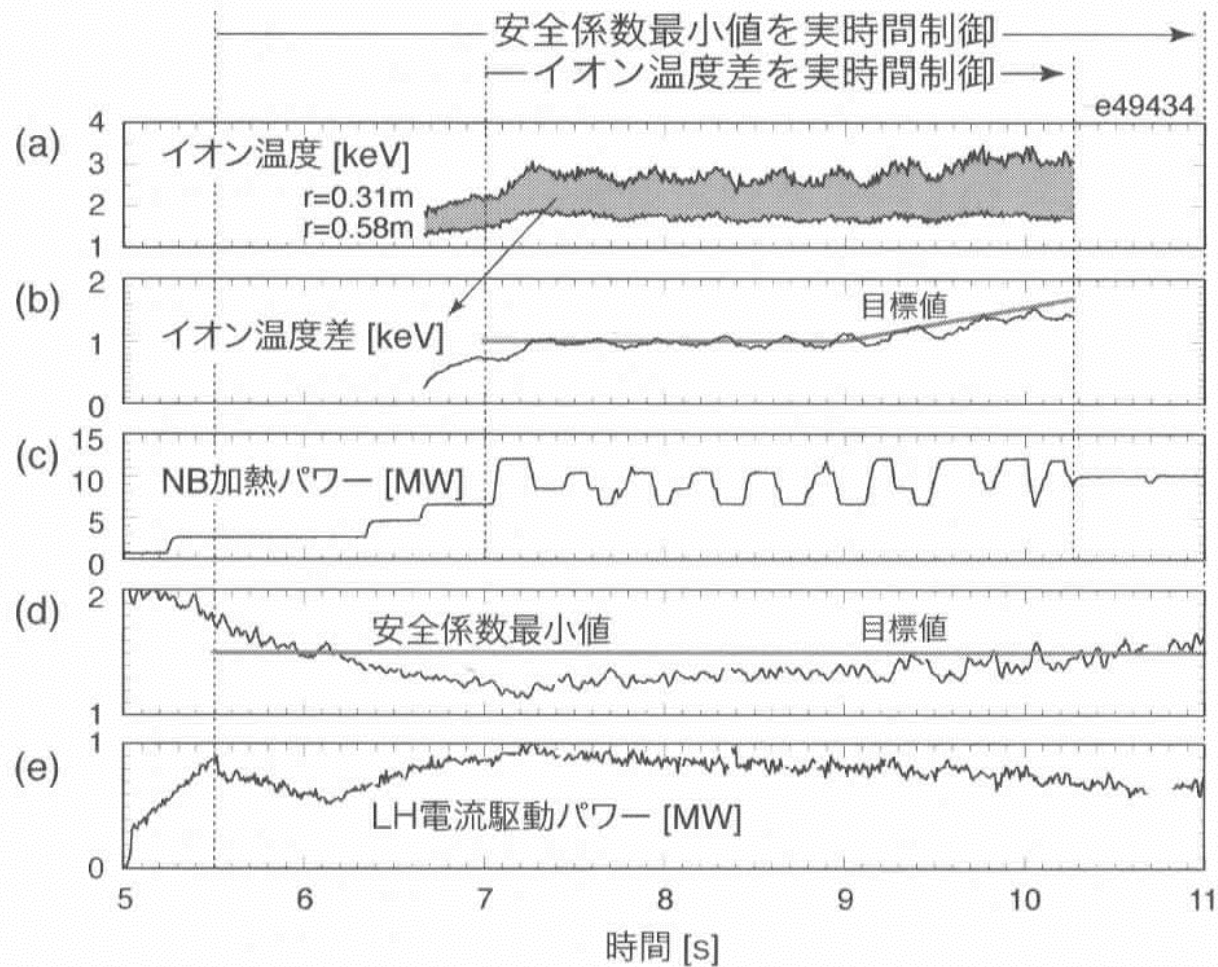


図5 安全係数最小値とイオン温度勾配の複合実時間制御の放電波形[9]. (a) $r=0.31\text{ m}$ と $r=0.58\text{ m}$ におけるイオン温度, (b)イオン温度差の目標値 (グレー線) と実測値 (黒線), (c)イオン温度差制御用 NB 加熱パワー, (d)安全係数最小値の目標値 (グレー線) と実測値 (黒線), (d)安全係数最小値制御用 LH 電流駆動パワー.

制御テンソルの構築

- コントロールロジック

各アクチュエータと、制御量の関係は便宜的に以下のように書ける。

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_{puf} \\ P_{nbi} \\ P_{pel} \\ P_{imp} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{fus} \\ j(r) \\ n(r) \\ q_{div} \end{pmatrix}$$

支配テンソル アクチュエータベクトル 制御量ベクトル

これらのテンソル、ベクトルの適切な成分を見つけ出すことが大目標となる。

制御テンソルの構築

主な成果

支配テンソルの逆
行列(制御ロジック
テンソル)

出力

各制御量の測定値

ガスパフ

NBI

安全係数最
小値

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_{fus} \\ q_{min} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{puf} \\ P_{nbi} \end{pmatrix}$$

輸送コードを用いて、2×2の制御シミュレーションを行った。

輸送コード

$$\frac{\partial n_j(r, t)}{\partial t} = \frac{1}{V} \frac{\partial}{\partial r} \Gamma_{\text{ion}}^j(r, t) + S^j(r, t)$$

← プラズマ輸送方程式

$$\Gamma_{\text{ion}}^j(r, t) = V \langle |\nabla r|^2 \rangle \left(D_j \frac{\partial n_j(r, t)}{\partial r} + v_j n_j(r, t) \right)$$

$$S^j(r, t) = S_{\text{NBI}}^j(r, t) + S_{\text{ntr}}^j(r, t)$$

NBIソース

ガスパフソース

ボルツマン方程式より算出

1次元フォッカープランク方程式
より算出。同時にNBI電流も算出
される

輸送コード

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_j(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t)}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla f_j(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) & \quad \text{イオン化} \\ & = -(\sigma^{ei} + \sigma^{ii})v f_j(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) \\ & \quad + \sum_k \int d^3v' \sigma^{cx} |\mathbf{v} - \mathbf{v}'| (f_j(\mathbf{r}, \mathbf{v}', t), f_k(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) - f_j(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t), f_k(\mathbf{r}, \mathbf{v}', t)) \\ & \quad \text{荷電交換反応} \\ n_j(\mathbf{r}, t) & = \frac{1}{V'} \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \int dV \int d^3v f_j(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) \end{aligned}$$

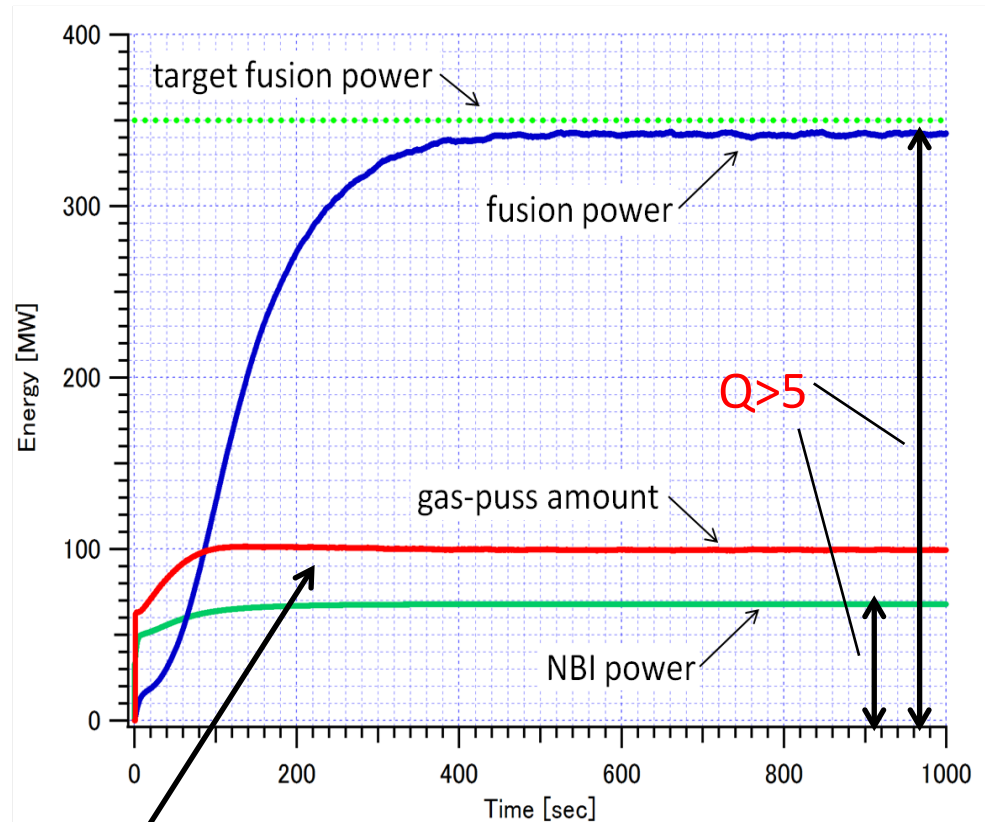
このボルツマン方程式がモンテカルロ法によって計算される

出力制御

The input parameters are follows

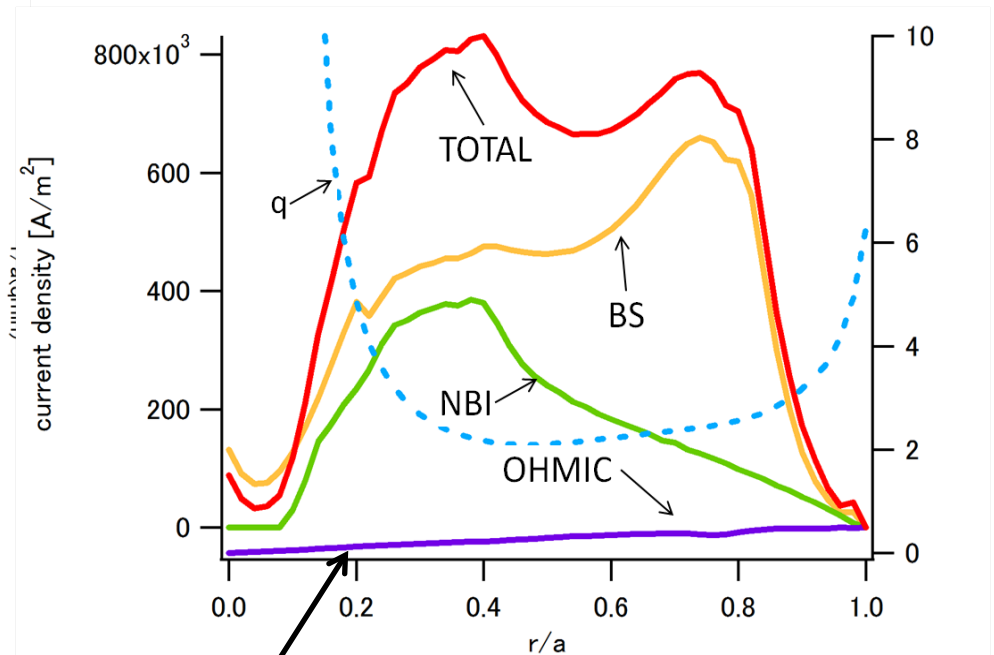
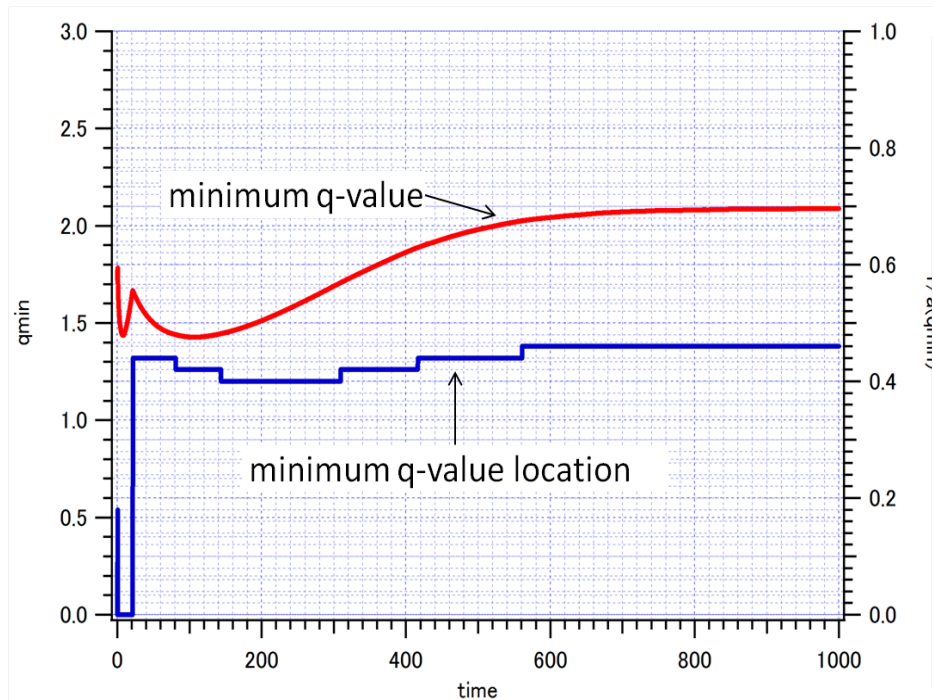
$R_p=6.3\text{m}$,
 $a_p=1.75\text{m}$, $\kappa=1.8$, $\delta=0.4$
 $I_p=9\text{MA}$, $B_t=4.76\text{T}$,
 $P_{nbi}=70\text{MW}$, $E_{nbi}=1\text{MeV}$,

$D_j=0.02/n_e(10^{20}\text{m}^{-3})$
 $\chi_j=0.08T_e(\text{keV})/n_e(10^{20}\text{m}^{-3})$



ガスパフ量はPID理論によって決定しており、これにより出力を目標値に持っていきることが出来ている。

出力制御



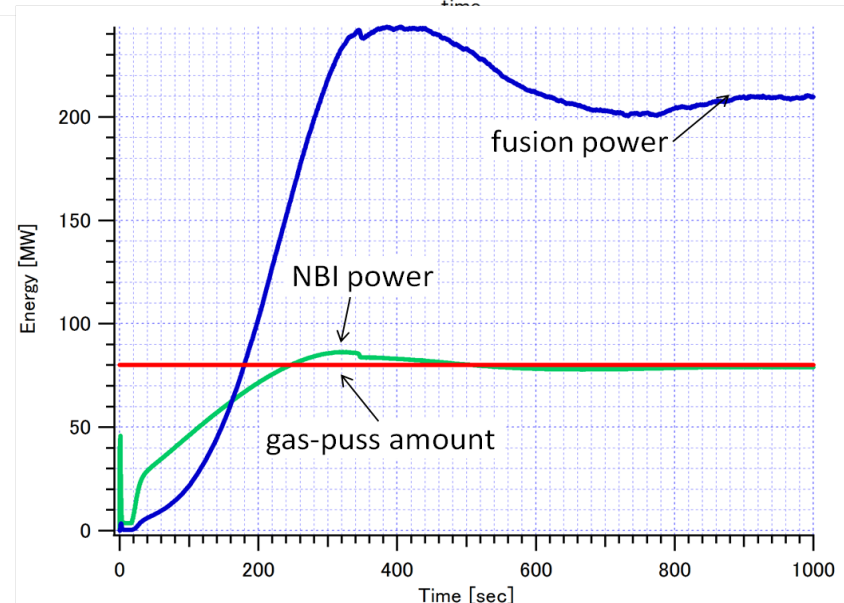
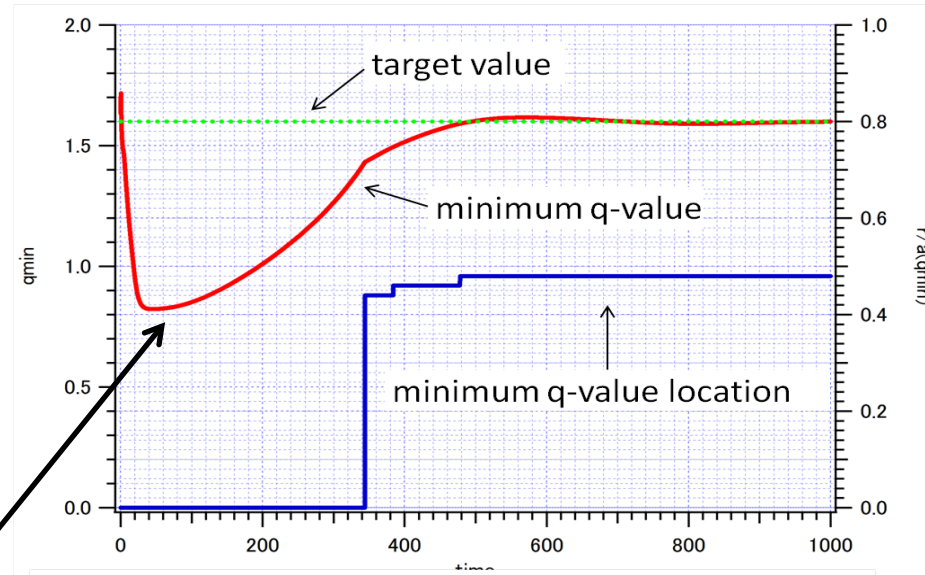
オーミック電流が0近くになっており、完全定常運転が表されている。

In this case,
 $f_{GW}=0.95, \beta_N=4.16$

安全係数最小値制御

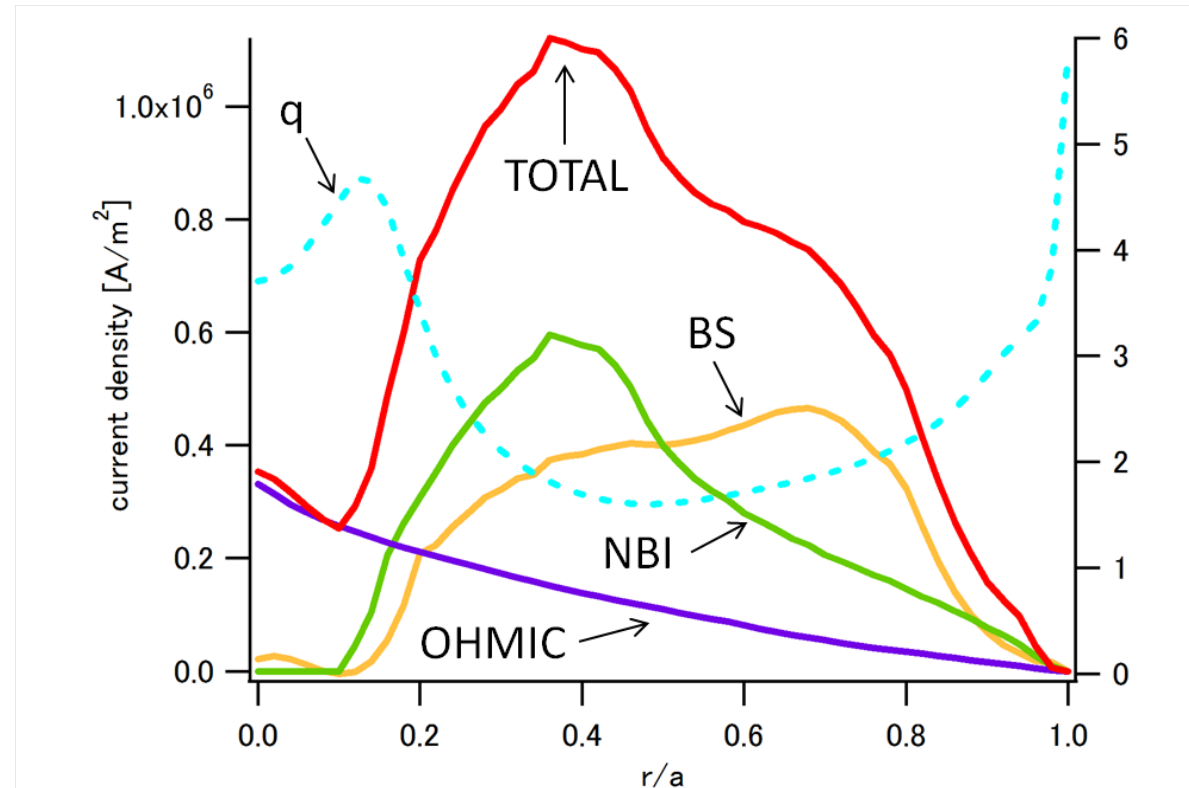
ほとんどのインプットパラメータは同一として、ガスパフ量を 8.0×10^{21} 個/secとし、NBIパワーはPID理論より決定している。

安全係数最小値は目標値へと到達している。



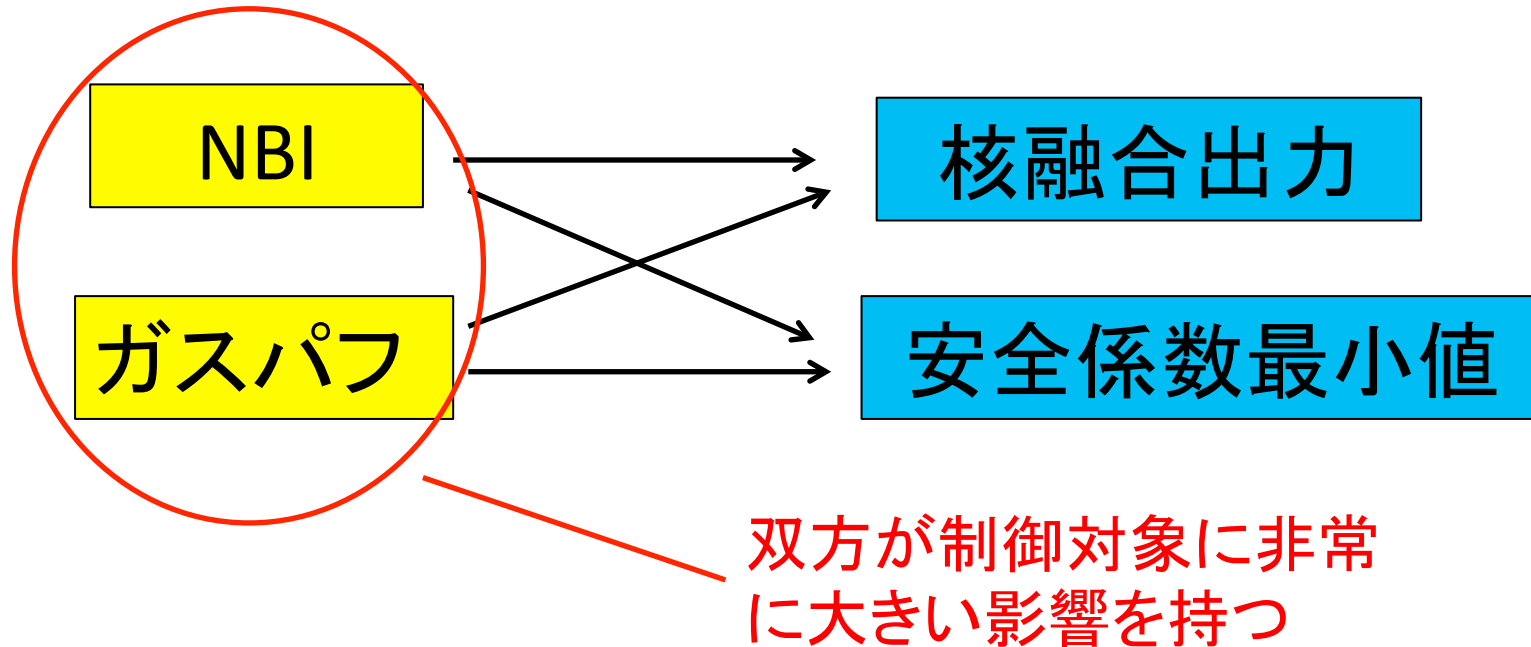
安全係数最小値制御

オーミック電流は0ではなく、またブートストラップ電流は出力制御の場合よりも低い。



理想的な核融合出力、電流分布を実現させるには、同時制御が必要となる。

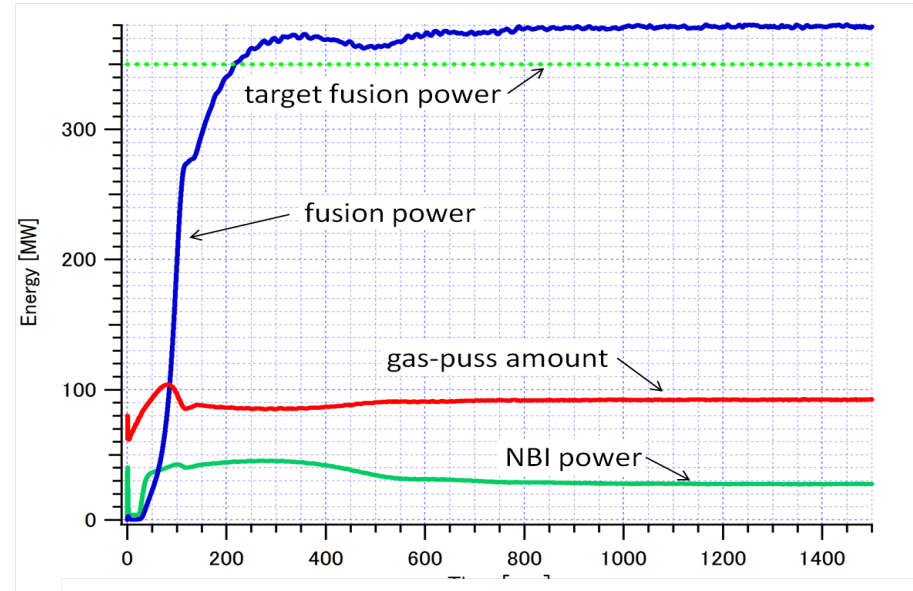
同時制御



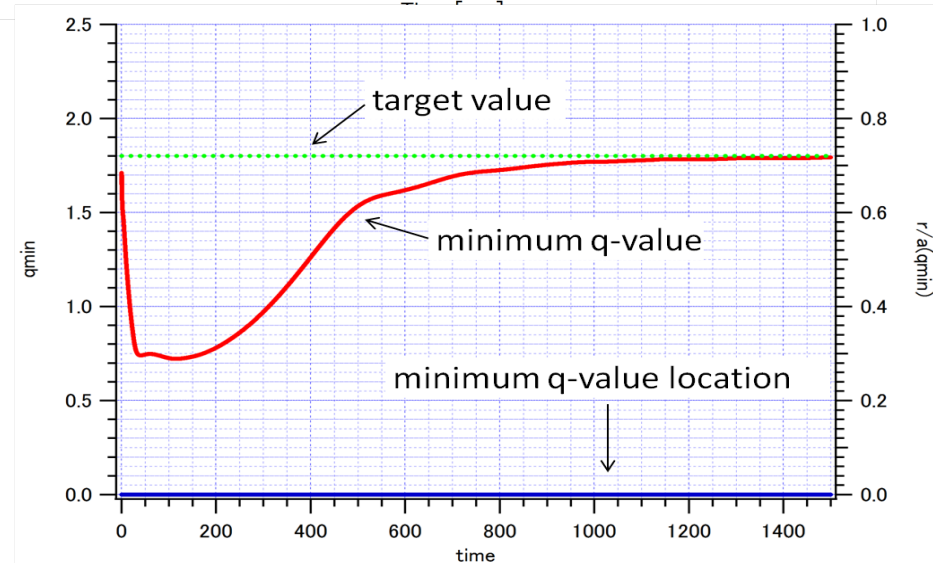
ガスパフ、及びNBIのPID係数を、前スライドと同一としてシミュレーションを行ったところ、激しく振動し制御が出来なかった。そのためNBIの係数を調整し、核融合出力の比例量及び微分量の項を加えたところ上手く一定値に持っていくことが出来た。

同時制御

核融合出力が一定値に到達しているが、目標値より若干高い。



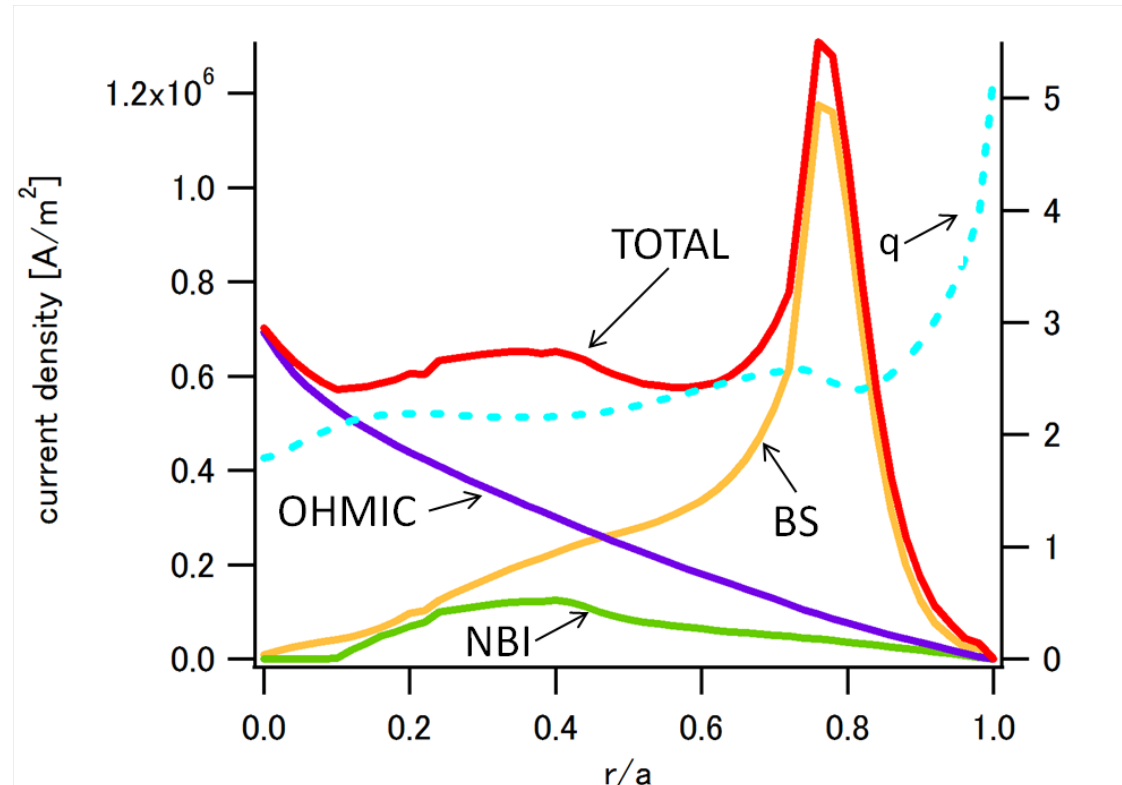
安全係数最小値が目標値に達しているが、負磁気シア型になっていない。



同時制御

オーミック電流が高く、完全定常運転になっていない。

In this case,
 $f_{GW}=1.043, \beta_N=3.30$



より詳細、かつ厳密な制御理論の構築が必要とされる。

燃焼制御における成果

- ・制御ロジック構築のための、燃焼制御シミュレーションを開始した。
- ・ガスパフ、NBIによる核融合出力、安全係数最小値の同時制御シミュレーションを行った。

今後の課題

- ・制御対象、アクチュエータ、測定可能量についての議論を深めていく。
- ・完全定常状態の再現を目指す。

Discussion about the components

| Ultimate goal | Direct parameter | mid parameter | measurable parameter |
|-------------------|--------------------------------------|---|--|
| Electrical output | P_{fus} | $n_e, Z_{eff}, f_D, f_T, T_i, T_e$ | f_D, f_T, Z_{eff}, T_i |
| Maintenance | q_{div}, W_{load} | $q_{rad}, q_{elm}, n_{edg}, \tau, Z_{eff}, f_{imp}$ | Z_{eff}, f_{imp} |
| stability | $\beta N, n_{GW}, q_{min}, rotation$ | $I_p, a_p, j(r), B_t$ | I_p, a_p, B_t |
| shape, position | $R_p, a_p, \kappa, \delta, d_{gap}$ | $I_p, j(r)$ | $I_p, R_p, a_p, d_{gap}, \kappa, \delta$ |

[4] Alan E. Costley 「Towards Diagnostics for a Fusion Reactor」IEEE TRANSACTIONS OF PLASMA SCIENCE, Vol.38, No10, October 2010

| | gas-puff | pellet | NBI | EC | coil |
|--|----------|--------|-----|----|------|
| ne | ○ | ○ | △ | | |
| Z _{eff} | ○ | ○ | | | |
| f _d ,f _T ,f _{imp} | ○ | ○ | △ | | |
| T _i | | | ○ | | |
| T _e | | | ○ | ○ | |
| q _{rad} | ○ | ○ | | | |
| q _{elm} | | ○ | | | ○ |
| I _p | | | ○ | ○ | ○ |
| j(r) | | | △ | ○ | △ |
| R _{p,ap} | | | | | ○ |
| κ, δ | | | | | ○ |
| d _{gap} | | | | | ○ |
| rotation | | | ○ | | |