

# 核融合固有の安全性を生かした 運転手法の検討

東京大学大学院新領域創成科学研究科  
先端エネルギー工学専攻  
岡野研究室  
古谷 晃

# 目次

- 核融合固有の安全性
- 負荷追従運転
- 負荷追従運転による炉の放射化への影響
- 負荷追従運転を行うための出力変動手法の検討
  - 検討に使用した核融合炉概念設計コードについて
  - DT比調節運転
  - 準パルス定常運転
- まとめ

# 核融合固有の安全性

## 核分裂炉

- 核燃料中の放射性生成物が崩壊熱を発生させる
- 運転停止直後の崩壊熱量を大きく下げることができない。

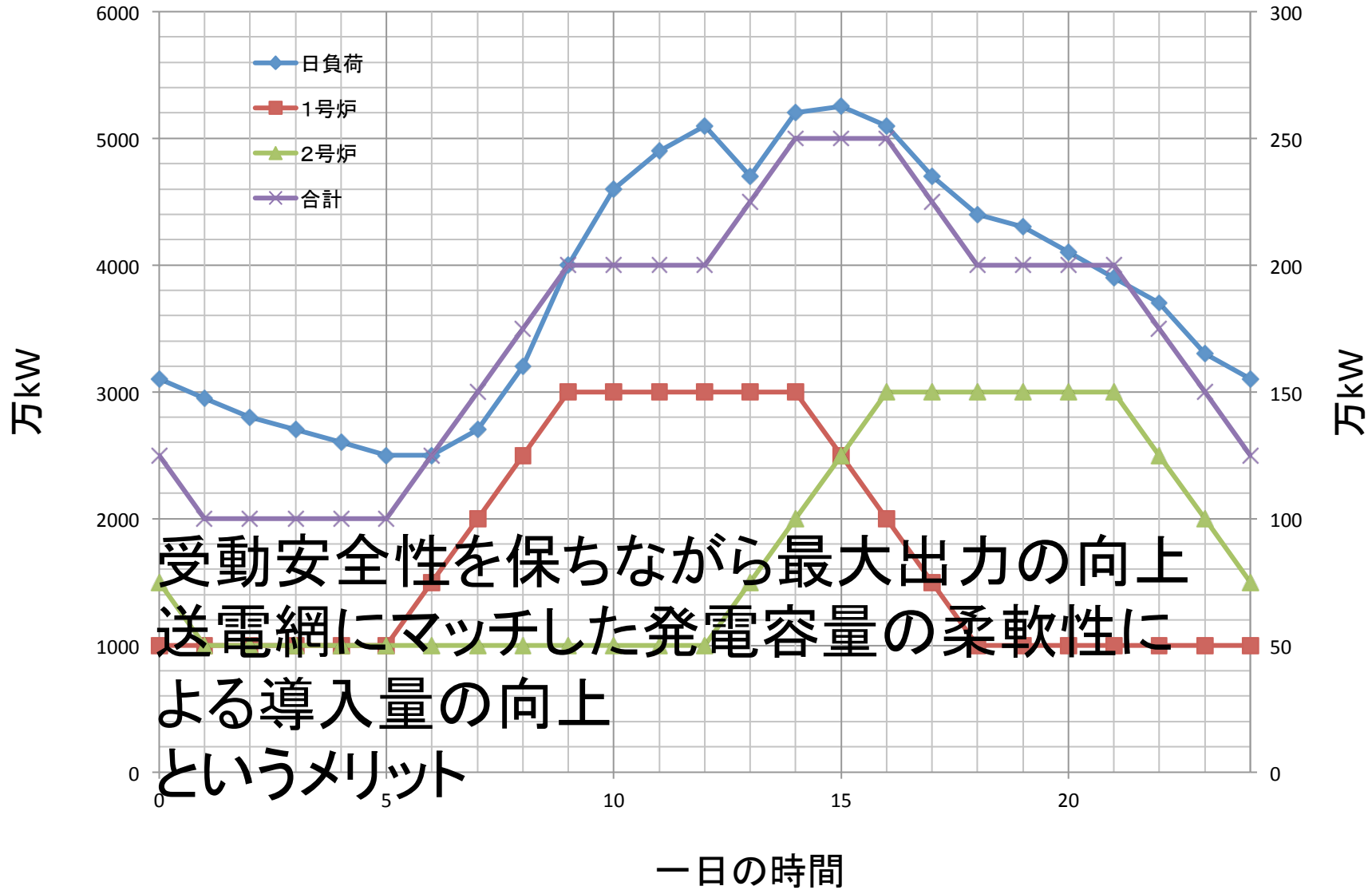
## 核融合炉

- 運転停止直後の崩壊熱は、中性子によって放射化された構造物によるものがほとんど
- 放射化しにくいような材料の選択や、中性子負荷をある程度に抑えるなどの設計により崩壊熱をコントロールすることができる。
- 核分裂炉に比べて大きなアドバンテージ

# 受動的的安全性

- 崩壊熱の発生密度がある程度以下では、緊急炉心冷却装置などの能動的な熱除去設備を設けずとも、設備の健全性を維持することが可能
- 設計条件として受動的的安全性を取り入れる場合、炉の大きさが核融合出力の大きな制約となりうる。

# 負荷追従運転



# 負荷追従運転による 炉の放射化への影響

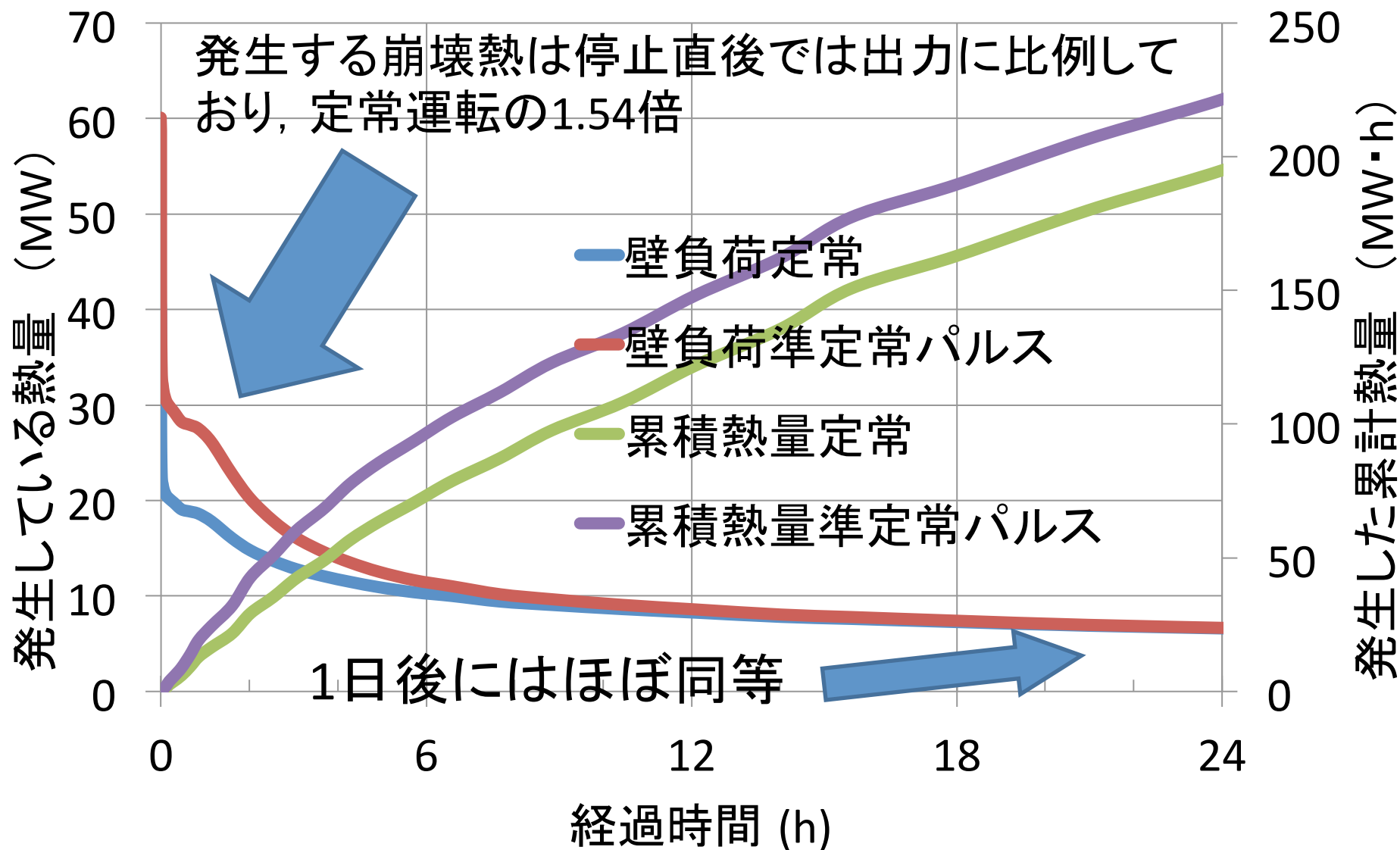
中性子負荷による放射化の検討

あらかじめ計算された崩壊熱の経過時間による変化から、各経過時間における崩壊熱の時定数を求め、サイクル運転による出力の増減の影響を計算した

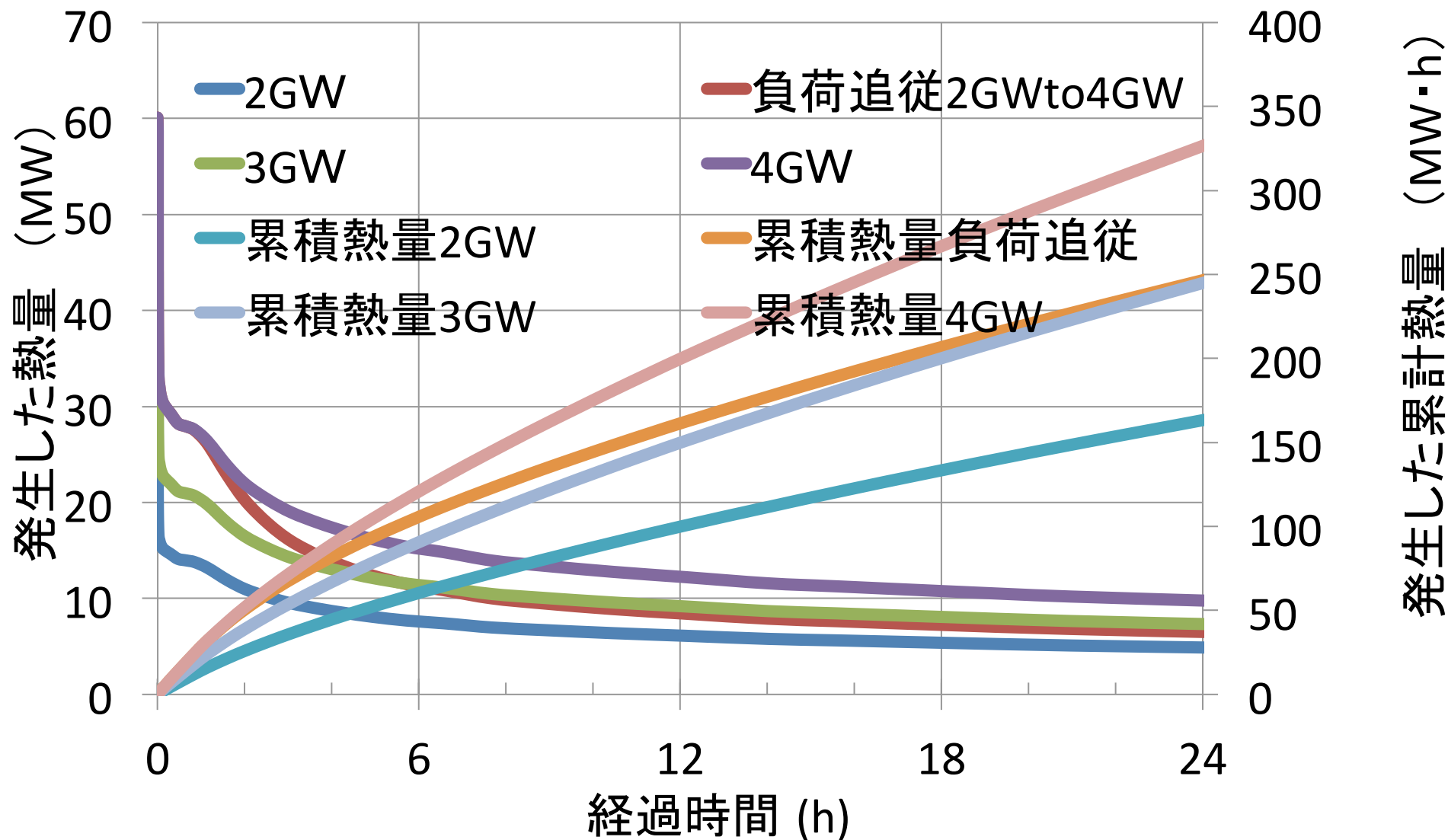
想定条件

- 運転パターン
- 核融合出力      2GW→4GW
- 高出力継続時間8時間
- 8時間の高出力運転終了直前で炉が停止したと仮定
- 運転時の平均核融合出力が等しい定常炉と比較し、負荷追従運転を行った場合でも安全性の尤度が保たれることを検証

# 負荷追従運転による 炉の放射化への影響

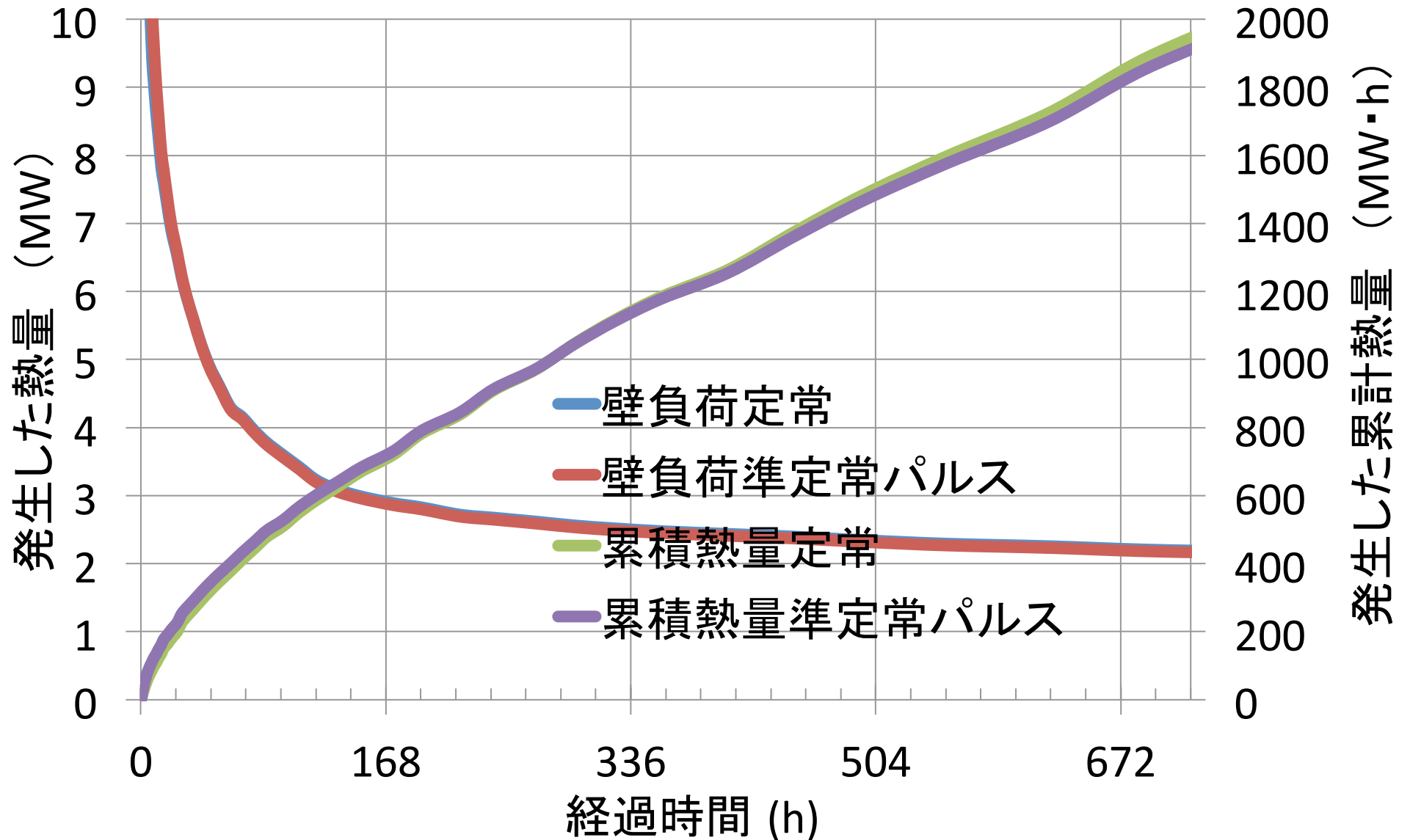


# 負荷追従運転と定常運転による 崩壊熱の比較

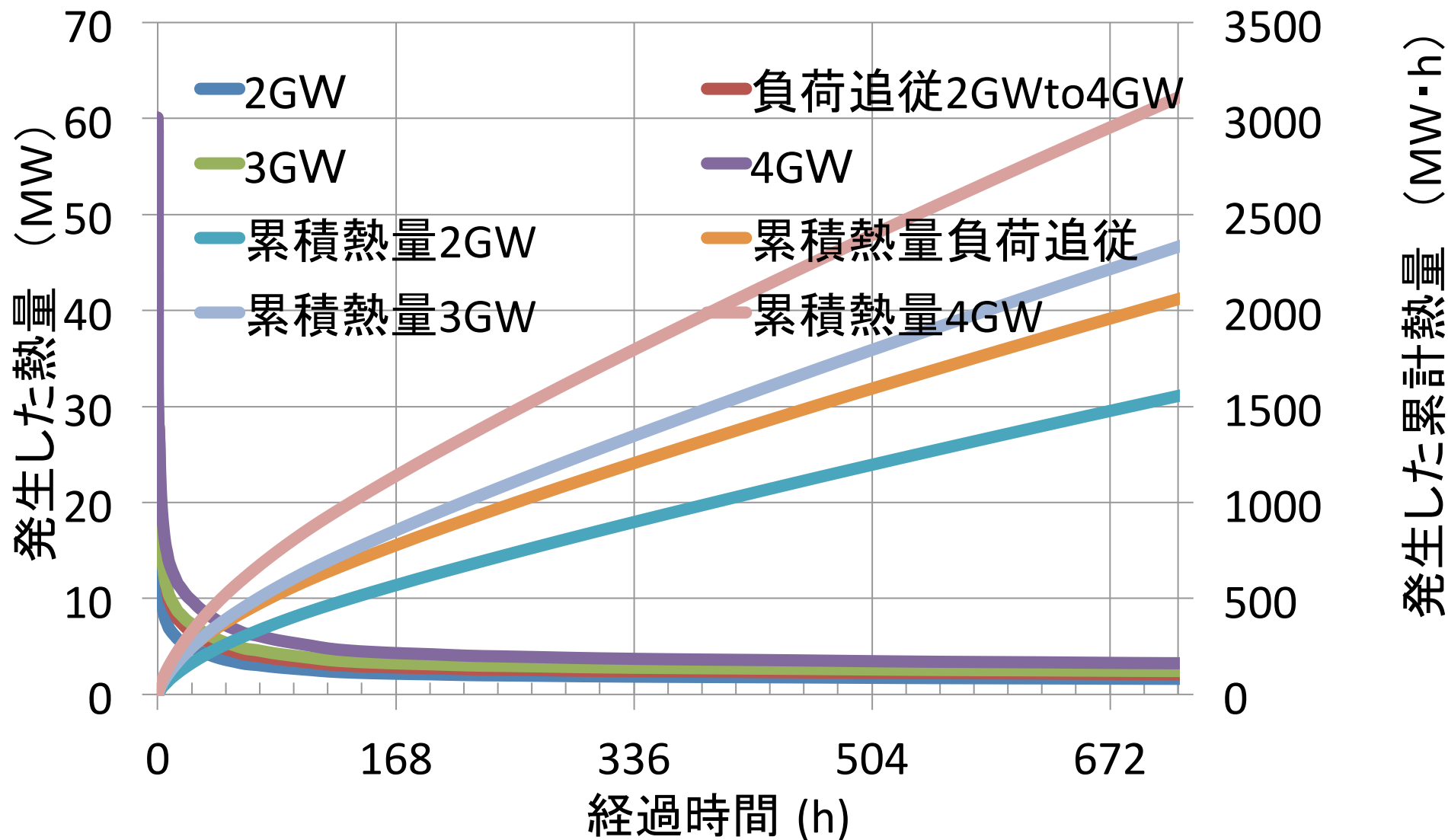




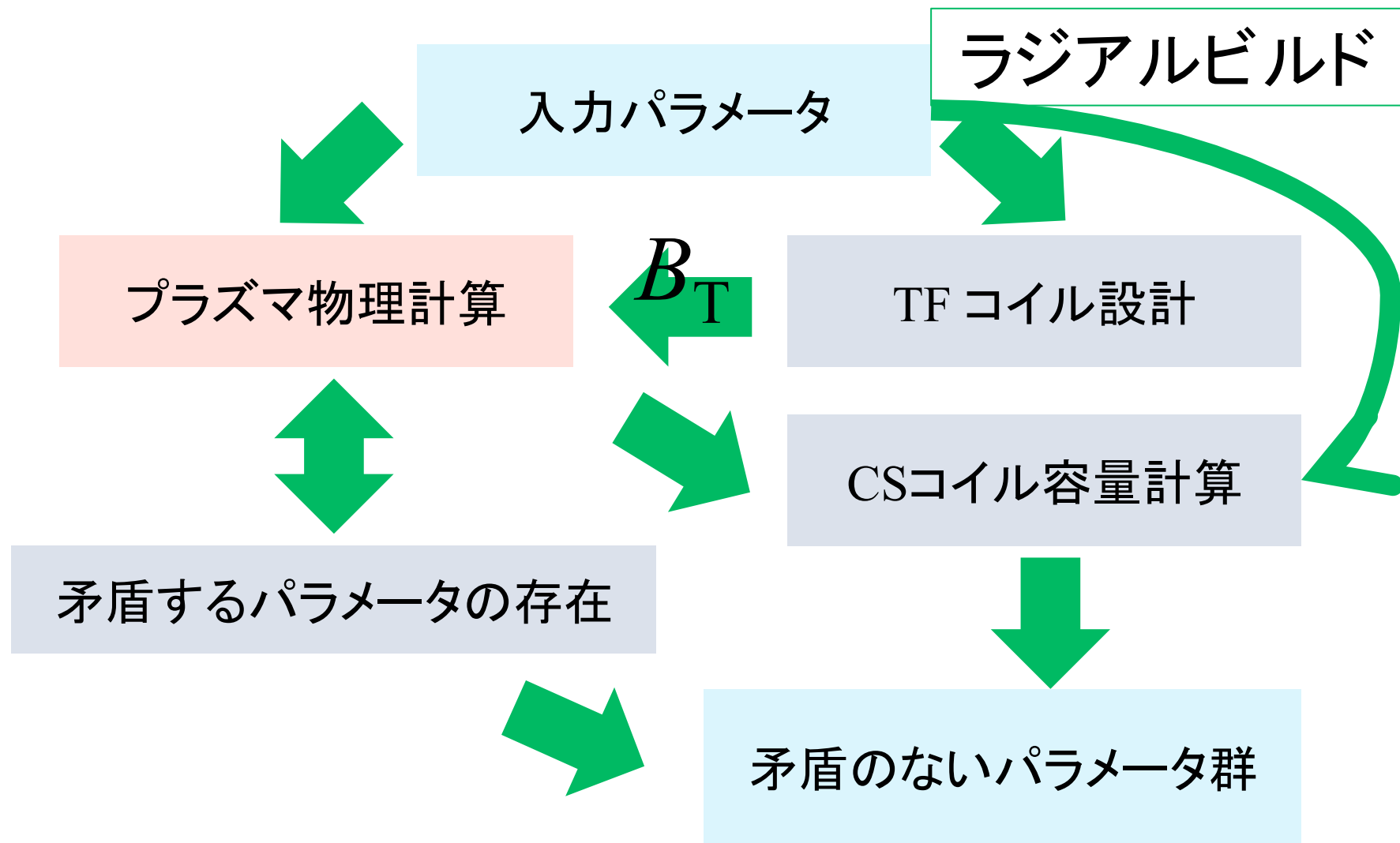
# 崩壊熱1カ月



# 負荷追従運転と定常運転による 崩壊熱の比較



# 核融合炉概念設計コード



# 設計条件

Y.R. Lin-Liu and R.D.  
Stambaugh: Nucl. Fusion44  
(2004) 548-554.

- 楕円度はアスペクト比から決定

$$k = \left[ a_1 + \left( \frac{a_2}{A} \right) - \left( \frac{a_3}{A^2} \right) \right] \cdot (a_4 \cdot A + a_5)$$

- $\beta_N < 0.75 \beta_{N_{\max}}$  ,  $n_e/n_{GW} \leq 1$

| a1  | a2  | a3  | a4  | a5  |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 0.3 | 9.1 | 5.7 | 0.1 | 0.6 |

$$\beta_{N_{\max}} = 10 \cdot (b_0 + b_1 k + b_2 k^2 + b_3 k^3) \times \coth \left( \frac{d_0 + d_1 k}{A^m} \right) \cdot \frac{1}{A^n}$$

| b0   | b1  | b2   | b3 | d0  | d1  | m   | n   |
|------|-----|------|----|-----|-----|-----|-----|
| -0.8 | 1.3 | -0.3 | 0  | 1.9 | 0.2 | 0.6 | 0.6 |

## 設計パラメータ

| プラズマパラメータ         |                                | TF コイル設計パラメータ |       |
|-------------------|--------------------------------|---------------|-------|
| 大半径 (m)           | 6,8                            | 超電導線材         | Nb3Al |
| アスペクト比            | 2.5,3                          | 運転温度 (K)      | 5     |
| 楕円度 $\kappa_{95}$ | アスペクト比による                      | 許容最大温度 (K)    | 250   |
| 中心磁場 $B_T$<br>(T) | コイル設計による                       | 許容端子間電圧 (KV)  | 20    |
| $\delta_{95}$     | 0.35                           | 許容応力 (MPa)    | 800   |
| Ti(keV)           | 18                             | コイル本数         | 15    |
| 密度 $n_e$          | $\beta_N$ と $n_e/n_{GW}$ により決定 | コイルケース厚さ (m)  | 0.1   |
| $\beta_N$         | 0.75 $\beta_{Nmax}$ を上限        | コイル太さ (m)     | 1     |
| $I_p$ (MA)        | $q_\Psi$ : 3,4,5               | コイル遮蔽厚さ (m)   | 1.4   |
|                   |                                | 運電電流 (kA)     | 100   |
|                   |                                | クエンチ遅れ時間(s)   | 0.5   |

# DT比の調節による出力変化手法

大半径6mアスペクト比2.5

|                                 | DT比   |       |       |       |       |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                 | 5:5   | 6:4   | 7:3   | 8:2   | 9:1   |
| 核融合出力 (MW)                      | 3030  | 2970  | 2760  | 2320  | 1410  |
| NBI加熱パワー (MW)                   | 176   | 181   | 186   | 191   | 193   |
| 発電端出力 (MW)                      | 1375  | 1349  | 1258  | 1070  | 673   |
| 送電端 (MW)                        | 998   | 965   | 869   | 683   | 303   |
| 中性子壁負荷 (MW/<br>m <sup>2</sup> ) | 3.36  | 3.29  | 3.05  | 2.57  | 1.55  |
| QELC                            | 4.4   | 4.2   | 3.8   | 3.1   | 1.9   |
| HH98                            | 1.139 | 1.156 | 1.205 | 1.308 | 1.54  |
| Beta-N                          | 4.15  | 4.15  | 4.15  | 4.15  | 4.03  |
| NE/NGW                          | 0.812 | 0.832 | 0.875 | 0.949 | 1.021 |
| IP (MA)                         | 18    | 18    | 18    | 18    | 18    |
| BS電流比                           | 0.61  | 0.613 | 0.633 | 0.678 | 0.719 |

# 準定常パルス運転手法の検討

- CSコイルによる誘導電流駆動と、NBIなどによる非誘導電流駆動を併用するハイブリッド運転によりCSコイルの充電と放電を電力需要に応じて行うことで、プラズマ電流を上下させることにより、核融合出力を変化させる運転を行う準パルス定常トカマク炉という運転方式を提案する。

## メリット

- 高出力時には誘導電流駆動で電流を補うので、非誘導電流駆動で消費される電力が減少し、さらなる高出力化、低出力時にはCSコイルの充電を行うのでその分より所内で電力が消費されることで、これらの効果により核融合出力変化以上に送電端出力を変化させることが可能

# 準定常パルス運転に基づいた概念設計

大半径6mでアスペクト比が2.5

|                             | 定常運転  |       |       | ハイブリッド運転    |       |           |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------------|-------|-----------|
|                             | 15    | 16.5  | 18    | 15 (CS-1.5) | 18    | 18 (CS+2) |
| IP (MA)                     | 15    | 16.5  | 18    | 15 (CS-1.5) | 18    | 18 (CS+2) |
| 核融合出力 (MW)                  | 2570  | 2930  | 3310  | 2740        | 3030  | 3620      |
| NBI加熱パワー (MW)               | 69    | 137   | 211   | 186         | 176   | 128       |
| 発電端出力 (MW)                  | 1137  | 1317  | 1507  | 1251        | 1375  | 1613      |
| 送電端 (MW)                    | 951   | 1007  | 1064  | 863         | 998   | 1305      |
| 中性子壁負荷 (MW/m <sup>2</sup> ) | 2.85  | 3.24  | 3.67  | 3.03        | 3.36  | 4.01      |
| QELC                        | 9.3   | 5.4   | 4     | 3.8         | 4.4   | 7.1       |
| HH98                        | 1.345 | 1.197 | 1.081 | 1.17        | 1.139 | 1.115     |
| Beta-N                      | 4.15  | 4.15  | 4.15  | 4.15        | 4.15  | 4.15      |
| NE/NGW                      | 0.983 | 0.935 | 0.894 | 0.89        | 0.812 | 0.958     |
| BS電流比                       | 0.838 | 0.719 | 0.628 | 0.684       | 0.61  | 0.671     |



# 大半径が8mでアスペクト比が3

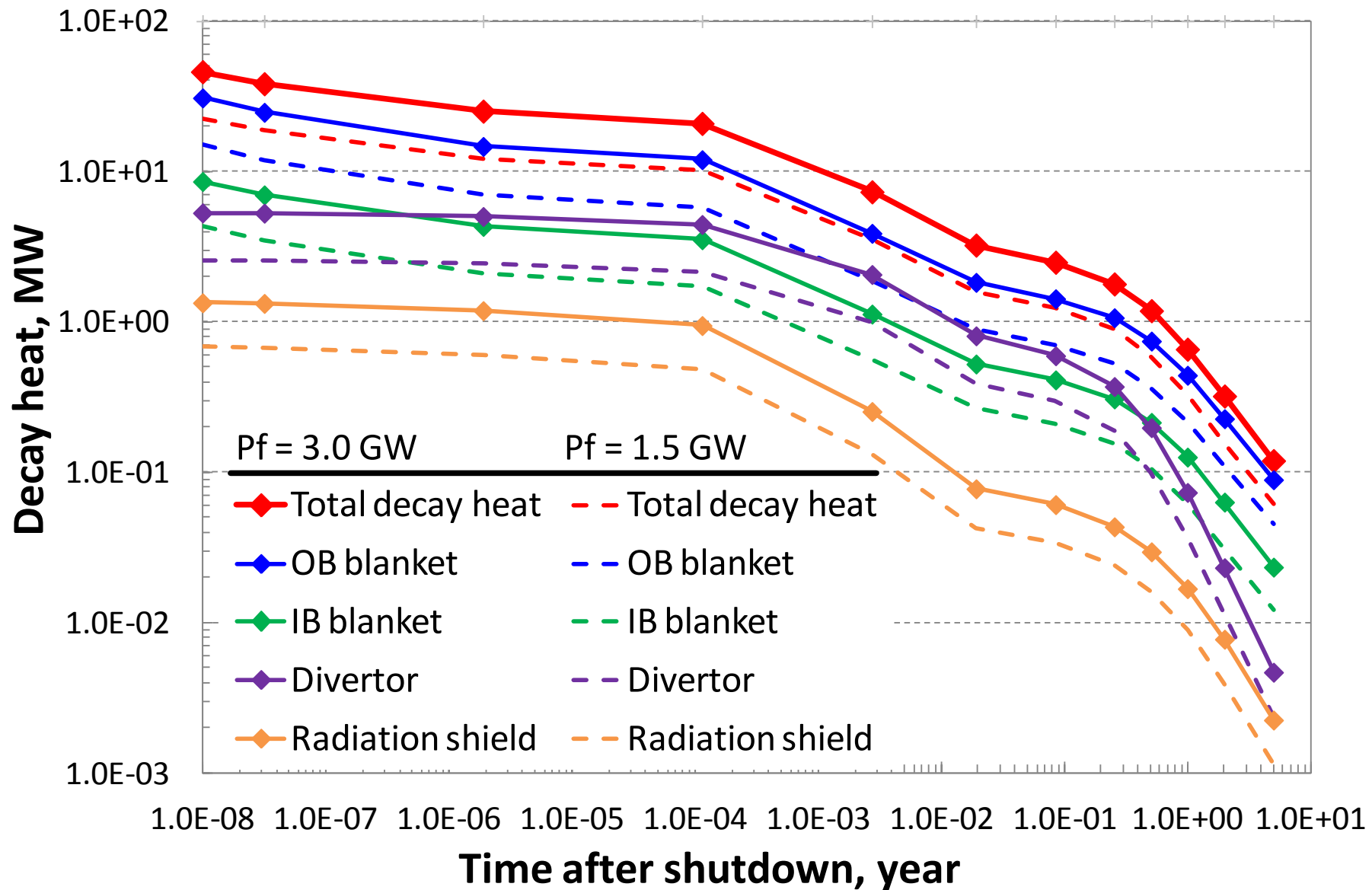
|                                    | 定常運転  |       |       | ハイブリッド運転  |       |           |           |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-----------|-------|-----------|-----------|
| IP (MA)                            | 16    | 18    | 22    | 16 (CS-2) | 18    | 22 (CS+4) | 22 (CS+4) |
| 核融合出力 (MW)                         | 2750  | 3240  | 4420  | 2570      | 2570  | 4130      | 6230      |
| NBI加熱<br>パワー<br>(MW)               | 55    | 141   | 324   | 105       | 98    | 117       | 73        |
| 発電端出力 (MW)                         | 1210  | 1452  | 2027  | 1152      | 1148  | 1832      | 2726      |
| 送電端<br>(MW)                        | 1042  | 1128  | 1372  | 905       | 912   | 1532      | 2460      |
| 中性子壁<br>負荷<br>(MW/m <sup>2</sup> ) | 2.15  | 2.53  | 3.45  | 2.01      | 2.01  | 3.23      | 4.87      |
| QELC                               | 12.3  | 5.8   | 3.5   | 6.2       | 6.6   | 8.9       | 21.3      |
| HH98                               | 1.148 | 0.993 | 0.792 | 1.119     | 1.1   | 0.912     | 0.921     |
| Beta-N                             | 3.13  | 3.13  | 3.13  | 3.13      | 3.05  | 3.1       | 3.69      |
| NE/NGW                             | 0.964 | 0.911 | 0.845 | 0.918     | 0.732 | 0.763     | 0.951     |
| BS電流比                              | 0.868 | 0.71  | 0.535 | 0.816     | 0.669 | 0.565     | 0.701     |

## 大半径が8mでアスペクト比が3, プラズマ性能はITERと同程度

|                                    | 定常運転  |       |       | ハイブリッド運転  |       |           |           |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-----------|-------|-----------|-----------|
| IP (MA)                            | 17    | 18    | 20    | 17 (CS-2) | 18    | 18 (CS+5) | 20 (CS+5) |
| 核融合出力 (MW)                         | 2210  | 2450  | 2950  | 2100      | 2450  | 2770      | 3310      |
| NBI加熱<br>パワー<br>(MW)               | 179   | 213   | 293   | 202       | 213   | 133       | 207       |
| 発電端出力 (MW)                         | 1020  | 1134  | 1378  | 979       | 1134  | 1247      | 1509      |
| 送電端<br>(MW)                        | 655   | 707   | 805   | 577       | 707   | 948       | 1073      |
| 中性子壁<br>負荷<br>(MW/m <sup>2</sup> ) | 1.73  | 1.91  | 2.3   | 1.64      | 1.91  | 2.16      | 2.59      |
| QELC                               | 3.2   | 3     | 2.6   | 2.7       | 3     | 5.3       | 4.1       |
| HH98                               | 1.202 | 1.13  | 1.007 | 1.187     | 1.13  | 1.169     | 1.038     |
| Beta-N                             | 3.6   | 3.6   | 3.6   | 3.6       | 3.6   | 3.6       | 3.6       |
| NE/NGW                             | 0.814 | 0.806 | 0.789 | 0.787     | 0.806 | 0.876     | 0.855     |
| BS電流比                              | 0.407 | 0.379 | 0.332 | 0.393     | 0.379 | 0.407     | 0.357     |

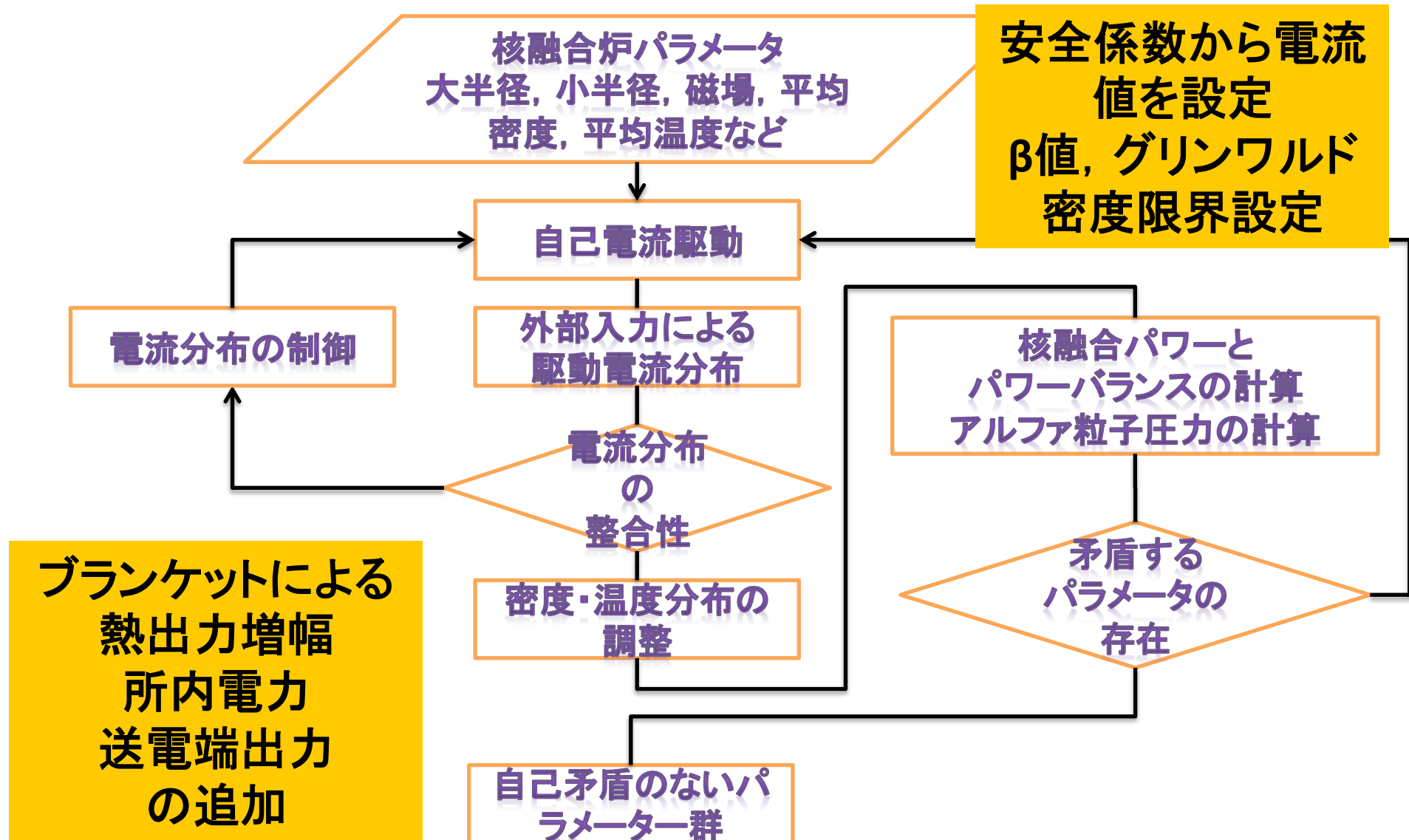
# まとめ

- 今回想定した条件では負荷追従運転を行った場合でも、崩壊熱の発生量は運転時の平均核融合出力と比例すると考えてよいことがわかった。
- DT比による出力調整の検討においては、可能であるが、シビアな割合の調整が必要となることが分かった。
- 準パルス定常運転という、CSコイルの充電時と放電時において出力を変化させる運転方法を提案した。
- 準パルス定常炉には既存の運転方式には無い大きなメリットが存在することが核融合炉概念設計コードにおいても確認することができた。



Y. Someya, K. Tobita, Estimation of decay heat in fusion DEMO reactor,  
 21st International Toki Conference, ITC-21 11/28-12/1, 2011.

# プラズマ物理計算コードのアルゴリズム



## CSコイル

$$\phi_{CS} = 2 \times \pi \times B_{CS} \times \left\{ R_{CS}^2 - \left( \frac{d_{CS}^2}{6} \right) \right\}$$

$$L_p = \mu_0 R_0 \left( \ln \frac{8R_0}{a_0} + \frac{l_i}{2} - 2 \right)$$

$$\phi_{ramp} = L_p I_p + C_{Ejima} \mu_0 R_0 I_p$$

$$\phi_{flat-top} \approx V_{loop} = 2.15 \times 10^{-3} Z_{eff} \langle \gamma_{NC} \rangle \frac{I_{ind} R_0}{\kappa a_0^2 (T_{10})^{1.5}}$$

$\phi_{flat-top}$  : CSコイルの一秒当たりの消費磁束量 ( $V \cdot s$ )

$V_{loop}$  : トーラス周回方向の周回電圧 ( $V$ )

$Z_{eff}$  : 実効電荷数

$\langle \gamma_{NC} \rangle$  : 新古典抵抗性増幅係数

$I_{ind}$  : CSコイルによる誘導電流 ( $A$ )

$\kappa$  : 楕円度

$T_{10}$  : プラズマの温度/ $10keV$

# 準定常パルス運転に基づいた概念設計

大半径6mでアスペクト比が2.5

- この案は受動的安全性を確保したままピーク時に高出力で運転することを念頭に置いて計算を行った。

|                             |      |      |      |
|-----------------------------|------|------|------|
| CSコイル (MA)                  | -1.5 | 0    | 2    |
| プラズマ電流 (MA)                 | 16.5 | 18   | 18   |
| 送電端出力 (MW)                  | 860  | 1000 | 1300 |
| 中性子壁負荷 (MW/m <sup>2</sup> ) | 3    | 3.36 | 4    |
| 運転可能時間 (h)                  |      |      | 4.5  |

# 準定常パルス運転に基づいた概念設計

- 大半径が8mでアスペクト比が3
- この案は定常運転で送電端出力1GWを達成できる最小の大半径が8mと考えられていることから、中性子壁負荷の平均を抑えながら、どこまでピーク時の出力を確保できるかを念頭に置いて計算を行った。
- 大半径が大きいので中性子壁負荷も大半径6mの炉に比べて低くなっており、さらにCSコイルが大きいので、フルに使った場合1日間高出力運転が可能となっている。

|                             |      |      |      |      |
|-----------------------------|------|------|------|------|
| CSコイル (MA)                  | -1.5 | 0    | 4    | 4    |
| プラズマ電流 (MA)                 | 16   | 18   | 18   | 22   |
| 送電端出力 (MW)                  | 905  | 912  | 1530 | 2460 |
| 中性子壁負荷 (MW/m <sup>2</sup> ) | 2.01 | 2.01 | 3.23 | 4.87 |
| 運転可能時間 (h)                  |      |      | 24<  | 24<  |



# 準定常パルス運転に基づいた概念設計

- 大半径が8mでアスペクト比が3, ただし, プラズマ性能はITERと同程度のレベルを想定している.
- この案は, 万が一プラズマの高性能化が達成できなかった場合, 負荷に追従する形のなかでどこまで高出力運転ができるかを検討するものである.
- 高出力モードで1GWを超えており, プラズマ性能の低さがカバーされていることが分かる.

|                             |      |      |      |
|-----------------------------|------|------|------|
| CSコイル (MA)                  | -2   | 0    | 5    |
| プラズマ電流 (MA)                 | 17   | 18   | 20   |
| 送電端出力 (MW)                  | 580  | 707  | 1070 |
| 中性子壁負荷 (MW/m <sup>2</sup> ) | 1.64 | 1.91 | 2.59 |
| 運転可能時間 (h)                  |      |      | 18   |

