

## トカマクにおける垂直移動現象の緩和 How to mitigate vertical displacement events in tokamak reactors?

松山顕之<sup>1</sup>、Hervé Dutrieux<sup>2</sup>、宮本齊児<sup>3</sup>、相羽信行<sup>1</sup>  
Akinobu Matsuyama<sup>1</sup>、Hervé Dutrieux<sup>2</sup>、Seiji Miyamoto<sup>3</sup>、Nobuyuki Aiba<sup>1</sup>

<sup>1</sup>量研機構, <sup>2</sup>École Polytechnique, <sup>3</sup>RIST  
<sup>1</sup>QST, <sup>2</sup>École Polytechnique, <sup>3</sup>RIST

核融合原型炉設計においては、ディスラプション時の垂直移動現象(VDEs)に伴う電磁力を評価し、炉内機器への影響を最小化する方策を検討する必要があるが、VDEは装置固有のポロイダルコイル及びシエルの配置とディスラプション時のプラズマダイナミクスが複雑に絡んだ問題であり、どのような設計がVDEの緩和につながるかは必ずしも明確ではない。ここでは当研究グループでのトカマク型原型炉のVDE緩和に関する研究の現状を報告する。

### 熱負荷緩和とVDE回避の整合性

縦長断面トカマクは導体壁により安定化されるが、壁の有限の電気抵抗により壁のL/R時間程度の成長率を持つ抵抗性壁モードが残るため、プラズマの維持には外部コイル系によるフィードバック制御が必要である。他方、ディスラプションによる電流クエンチが生じると円形断面のプラズマであっても上下位置モードの成長率は有限となる。ITERではディスラプションによる第一壁・ダイバータ板への熱負荷を低減するため大量不純物入射法の開発が進められているが、緩和ディスラプション時には強い不純物放射により電子温度が下がるので、電流減衰時間は壁の時定数よりも十分短くなる傾向にあり、容器外コイルの制御が有効でない。このため、中性子照射環境下で真空容器内コイルを設置するのが難しい原型炉では緩和ディスラプションに伴うVDEを回避(avoidance)することは原理的に困難と考えられる。

### VDE緩和に対するプラズマ形状の効果

VDEの向きはプラズマを取り囲む導体構造物とプラズマ電流中心の相対的な位置関係によって理解できる。理想的には、プラズマ電流中心の位置を(想定されるあらゆる状況下において)渦電流がプラズマに及ぼす力の中心(中立平衡点[2])に一致させることができれば定点消滅が期待できるが、実際には、電流重心の位置は外部コイルによるフィードバック制御のマ

ージンや熱クエンチ中の電流分布変化等の要因で中立平衡点からずれるので、中立平衡点からの有限のずれ( $\delta Z$ )に対するVDE特性の変化を理解し、適切なプラズマ形状と導体構造物の設計によってVDEを緩和(mitigation)することが重要である。ここではETAコードを用い、矩形導体壁を仮定した単純なシミュレーションによりプラズマ形状(楕円度、三角度)と導体壁がVDEに与える影響を解析する。正三角度配位ではプラズマの水平変位に対してVDEを加速する方向の力が働く真空磁場構造をとるため、高楕円度・高三角度配位では電流減衰時のVDEは抑制しにくい傾向にあることを示す。

### 理想MHDモードによる高速VDEへの遷移

抵抗性壁モードによる垂直方向変位 $\xi$ が一定以上大きくなると壁安定化が効かなくなりVDEは理想MHDモードのブランチに移る危険性がある[3]。理想モードが不安定化すると電流減衰よりも短い時定数で壁にプラズマが押し付けられるため、ハロー電流による強い電磁力負荷が生じる。特に、表面の安全係数が低下し、キンクモードが不安定化すればトロイダル非対称性を伴う危険なタイプのVDE[4]が発生する可能性がある。非対称VDEの回避はITERや原型炉における電磁力低減のための最も重要なガイドラインである。ここでは新たに軸対称モードを解析できるよう拡張された安定性解析コードMINERVA[5]を用いてETAコードで評価されたVDE中の平衡スライス安定性を解析した結果を示し、VDEの物理モデルとforce-free条件、理想MHD安定性の関係を議論する。

### 参考文献

- [1] E.A. Lazarus *et al.* Nucl. Fusion **30** (1990) 111.
- [2] Y. Nakamura, *et al.* Nucl. Fusion **36** (1996) 643
- [3] D.I. Kiramov and B.N. Breizman, Phys. Plasmas **24** (2017) 100702.
- [4] H. Strauss, Phys. Plasmas **22** (2015) 082509.
- [5] N. Aiba, *et al.*, Comput. Phys. Commun. **180** (2009) 1282.