

直流誘導加速器の開発

核融合分野に貢献する加速器の仕様と実現可能性ワークショップ
(ムーンショット目標10奥野プロジェクトキックオフワークショップ)

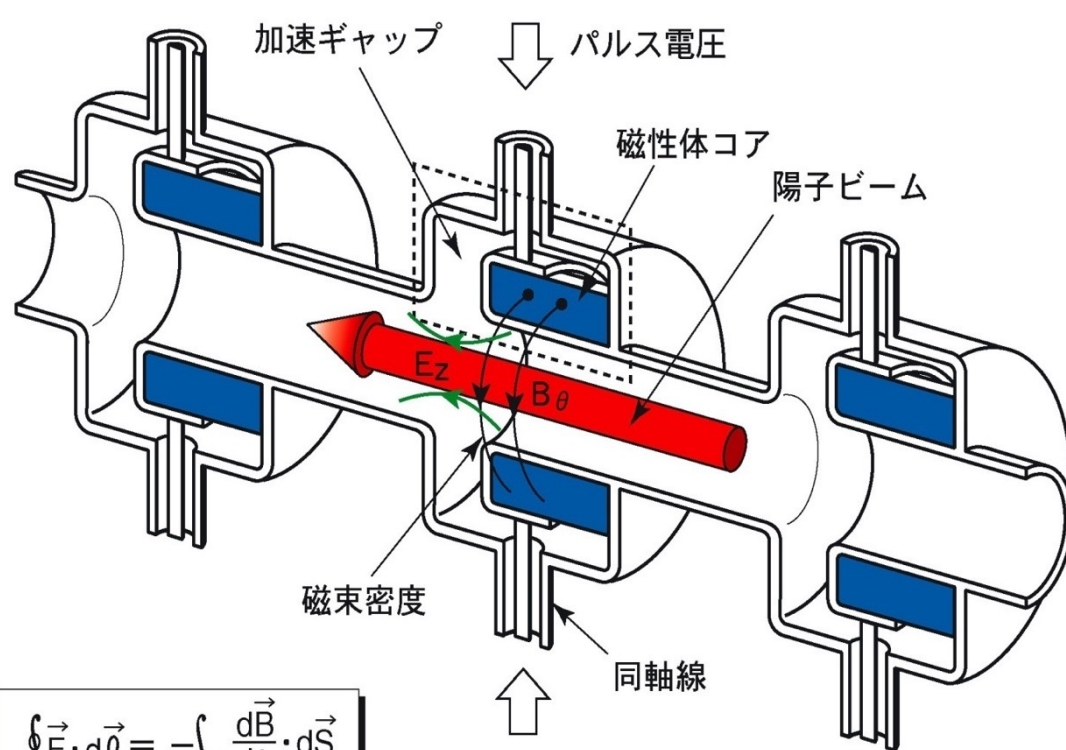
2025.4.17 JST東京本部別館

長谷川 純¹, 高山 健², 岡村 勝也², 高野 進²

¹東京科学大学, ²KEK

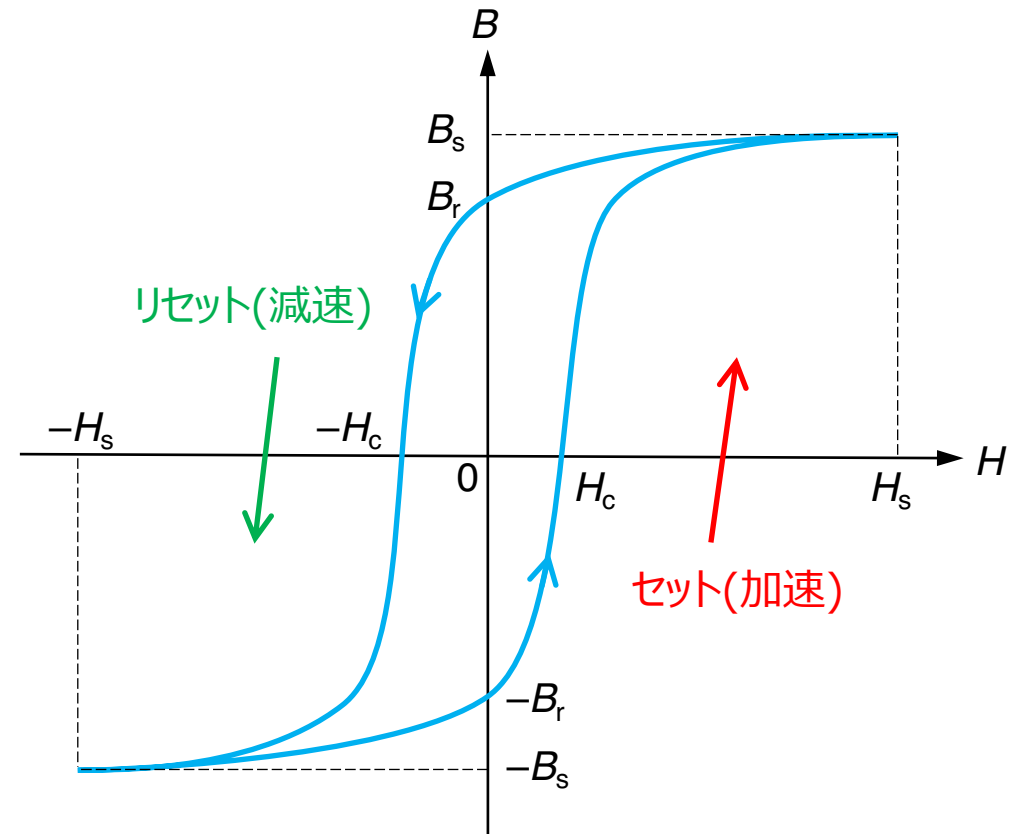
誘導加速とは？

- 磁性体コア内の磁束変化で生じる誘導電場により荷電粒子を加速.
- 1:1トランス → **1次側**の低インピーダンス電源で**2次側**のビームを駆動.
- 磁性体コアの磁気飽和を防ぐために**リセット**が必要.



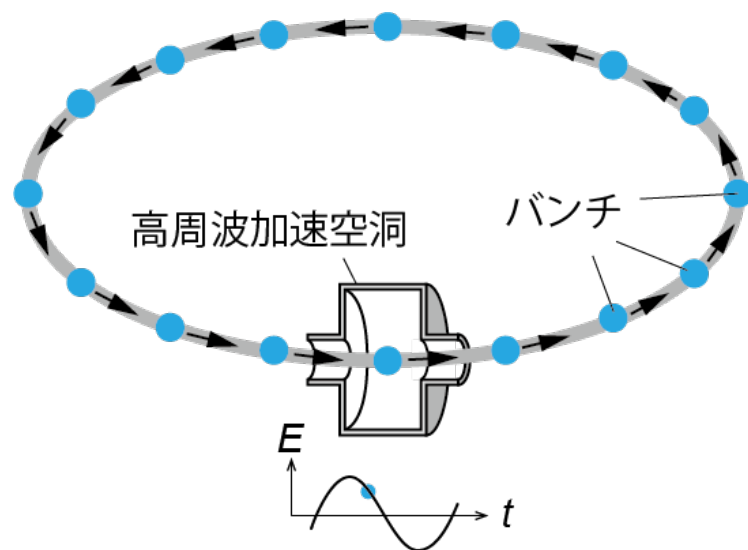
$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = - \int_S \frac{d\vec{B}}{dt} \cdot d\vec{S}$$

ファラデーの電磁誘導の法則

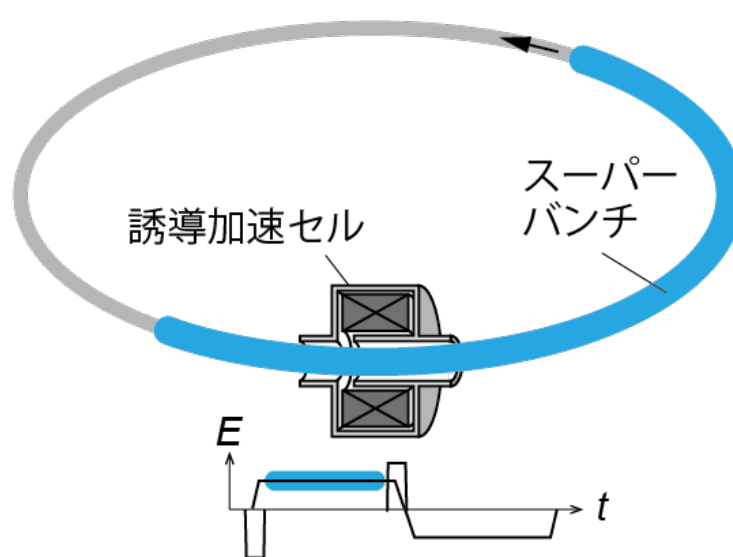


なぜ誘導加速？

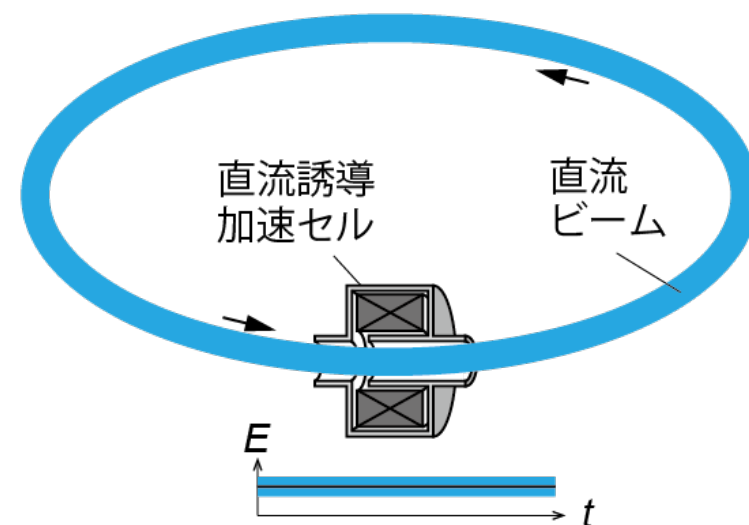
- 位相安定性の原理に囚われずに，長パルスのビームバンチ(スーパーバンチ)を加速できる → 空間電荷効果を緩和し，加速粒子数を大幅に増やせる。



高周波シンクロトロン



誘導加速シンクロトロン[1]



直流誘導加速シンクロトロン[2]

- 円形加速器において，誘導加速セルを用いた直流ビームの加速は可能か？[3]

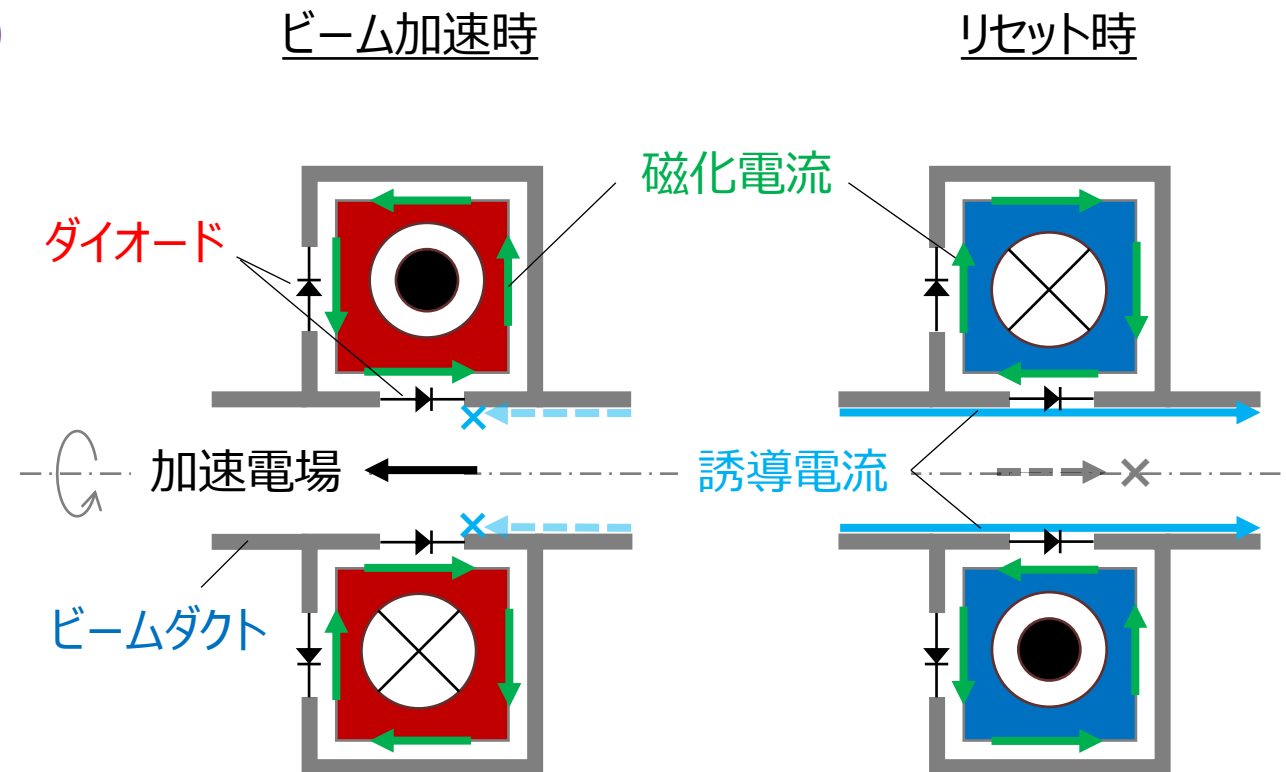
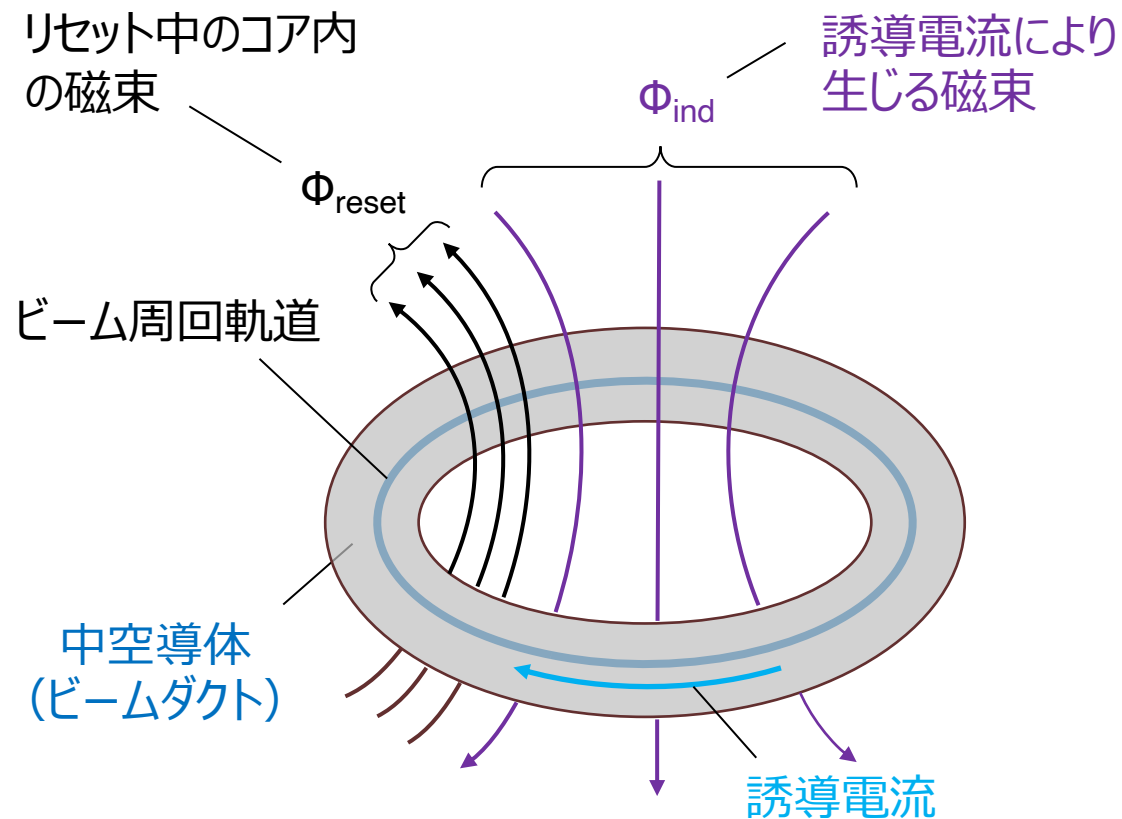
[1] K. Takayama, et al.: *Phys. Rev. Lett.* **98**, 054801 (2007)

[2] K. Takayama: *Nature Scientific Reports* **13**, 13595 (2023).

[3] 長谷川純，他：科研費基盤研究(B) 24K03200「円形加速器によるビーム直流加速のためのDC誘導加速セルの開発」

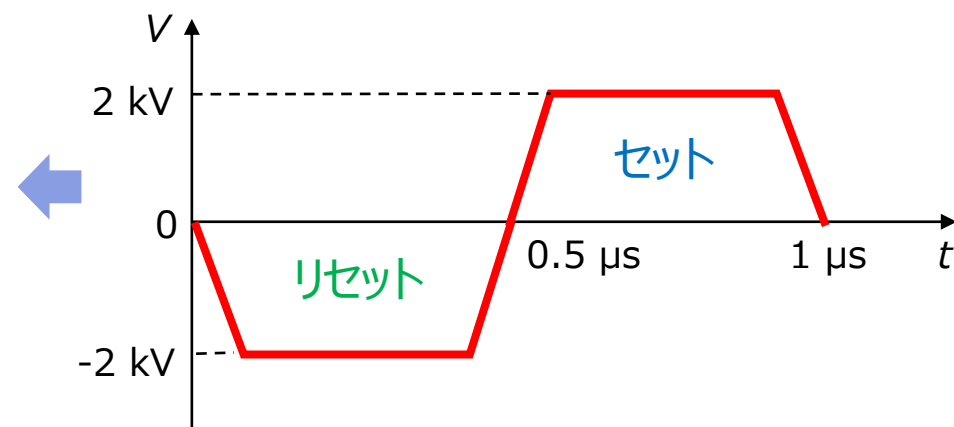
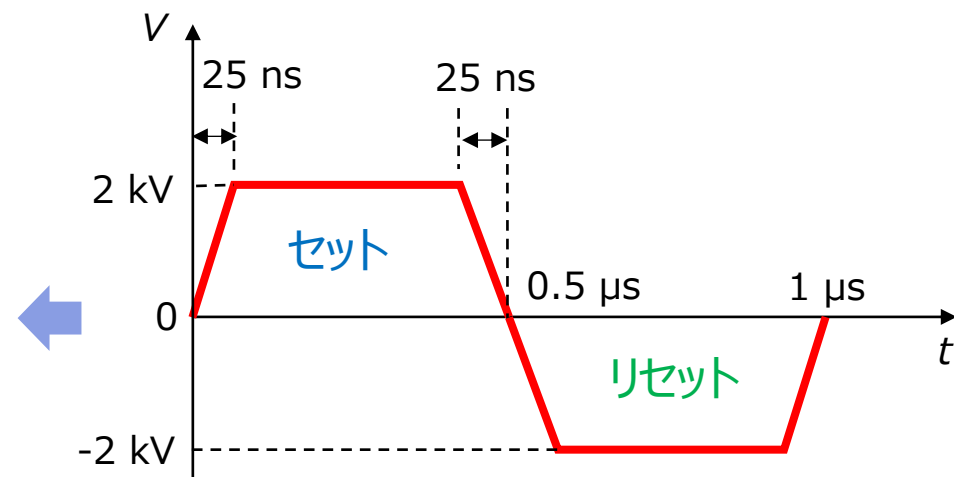
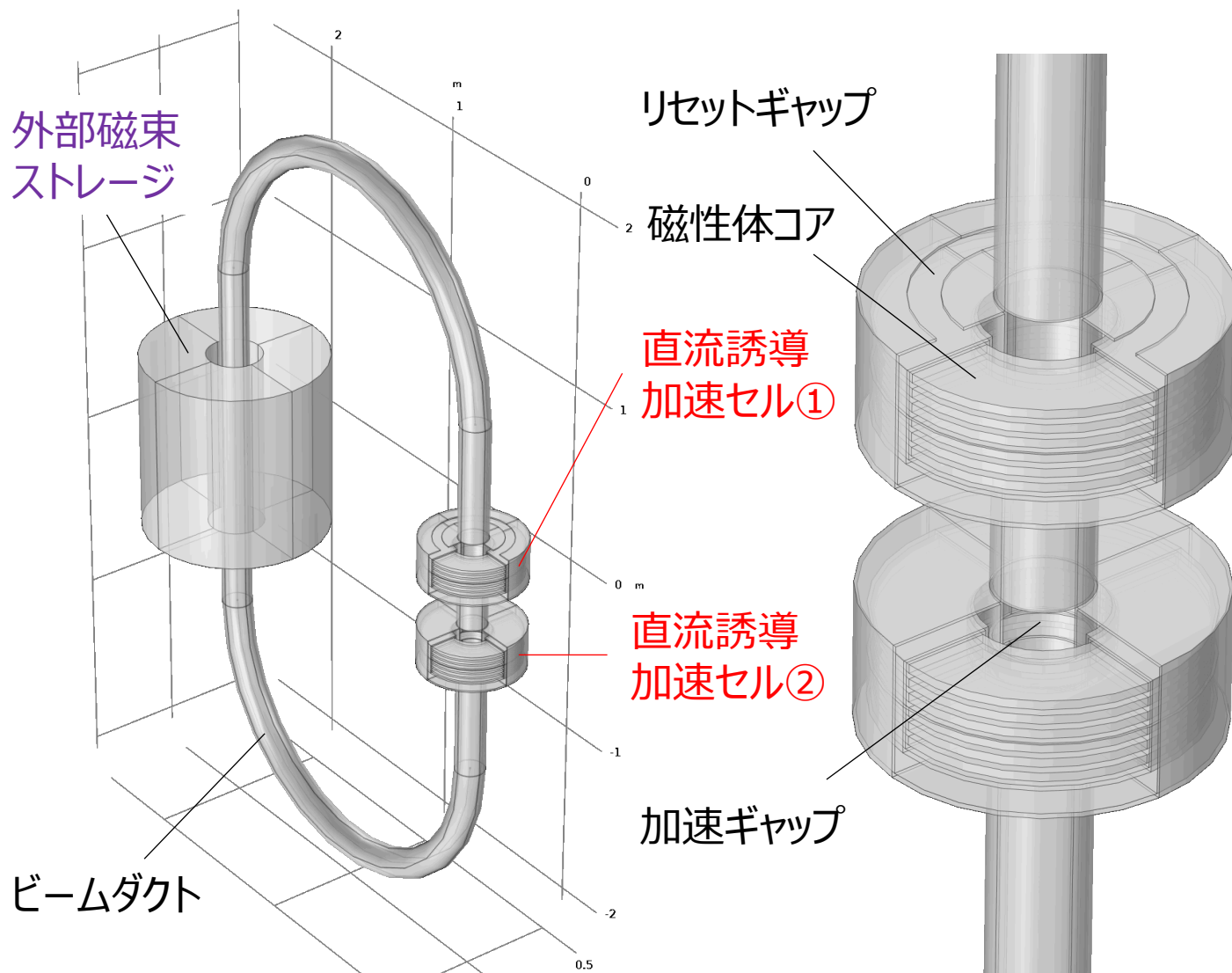
直流誘導加速の原理と課題

- ビームダクトに誘導電流を流すことで，磁性体コアのリセット操作に伴う減速電場の発生を防止 → 2台の誘導加速セルを同時に用いることで加速を持続．
- 高耐圧ダイオードのスイッチング特性，放射線耐性，外部磁束ストレージ



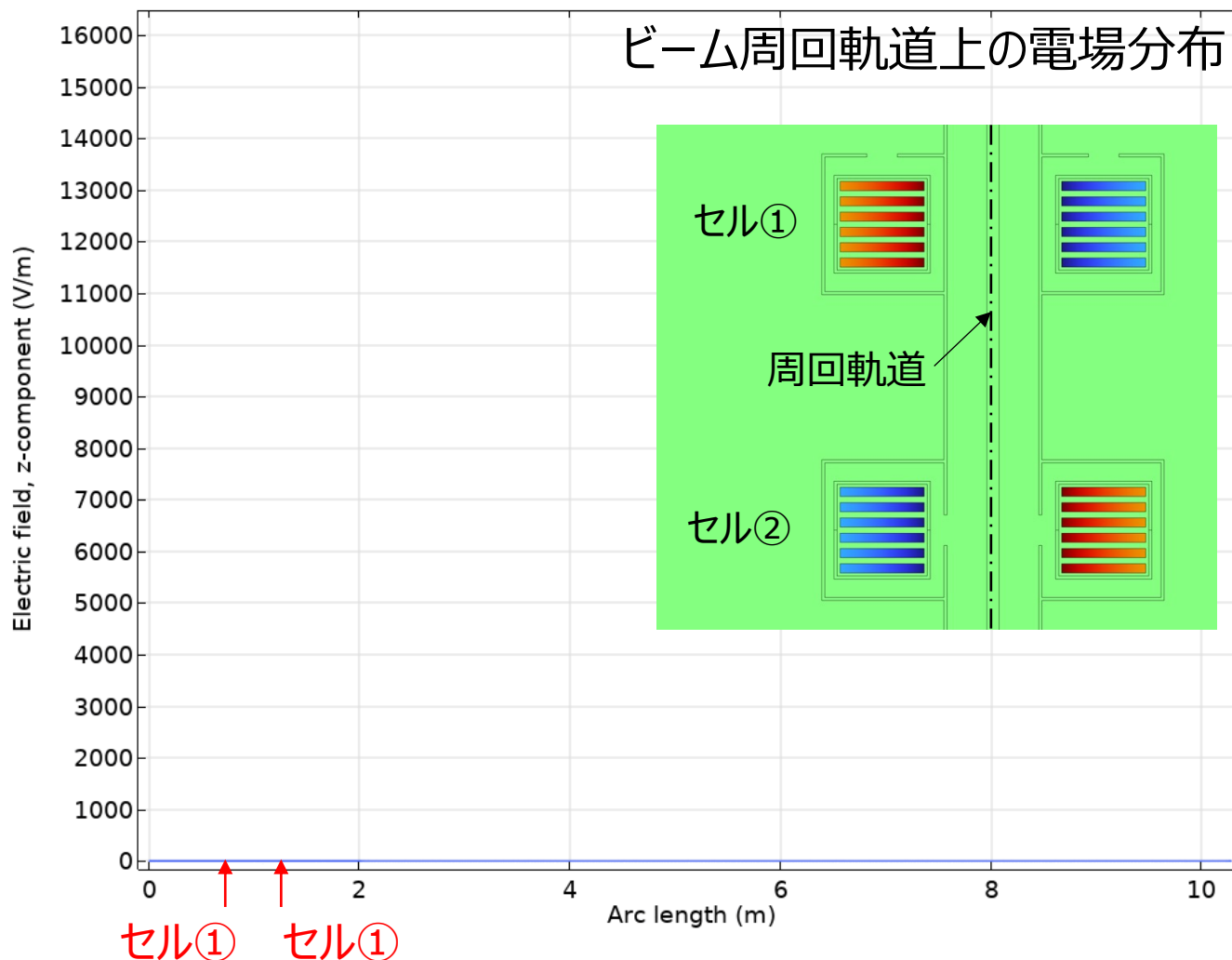
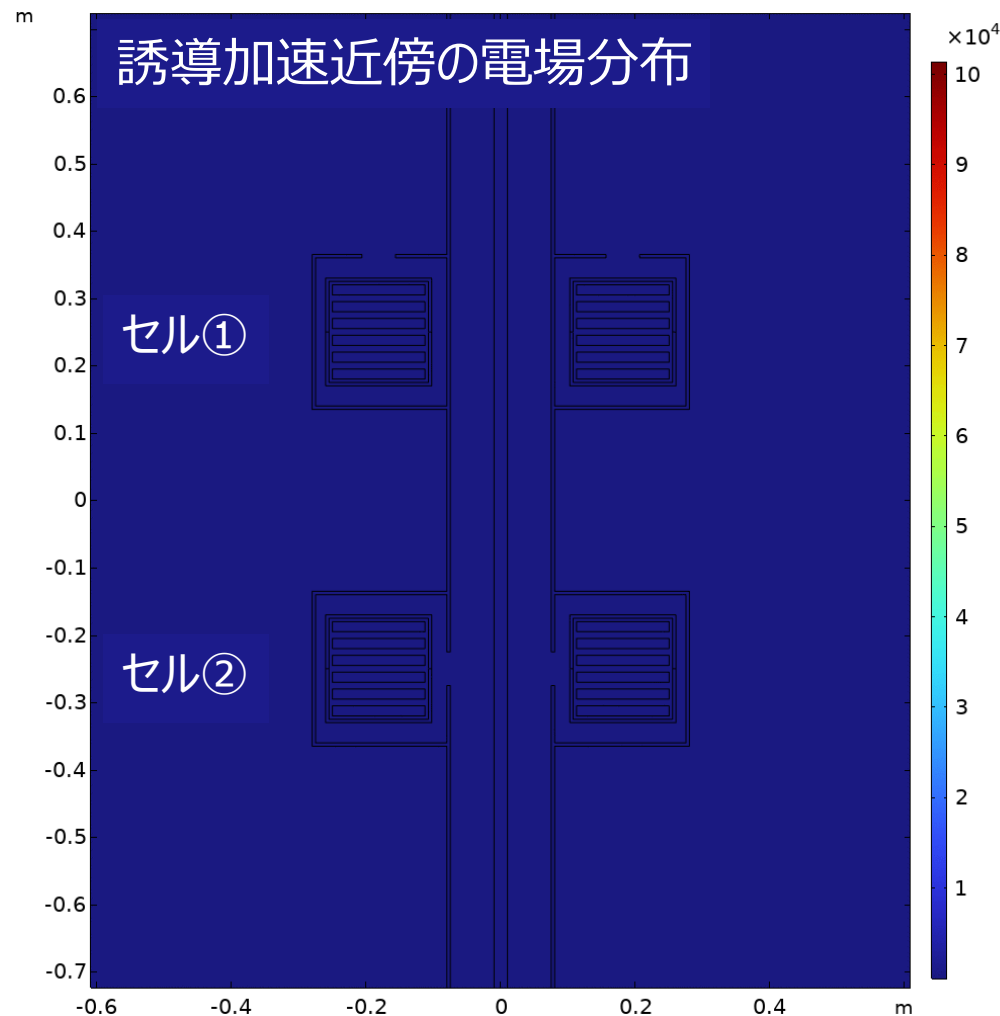
直流誘導加速器の3次元電磁場解析

- 直流誘導加速セル内での加速電場の発生と減速電場の抑制を実証。



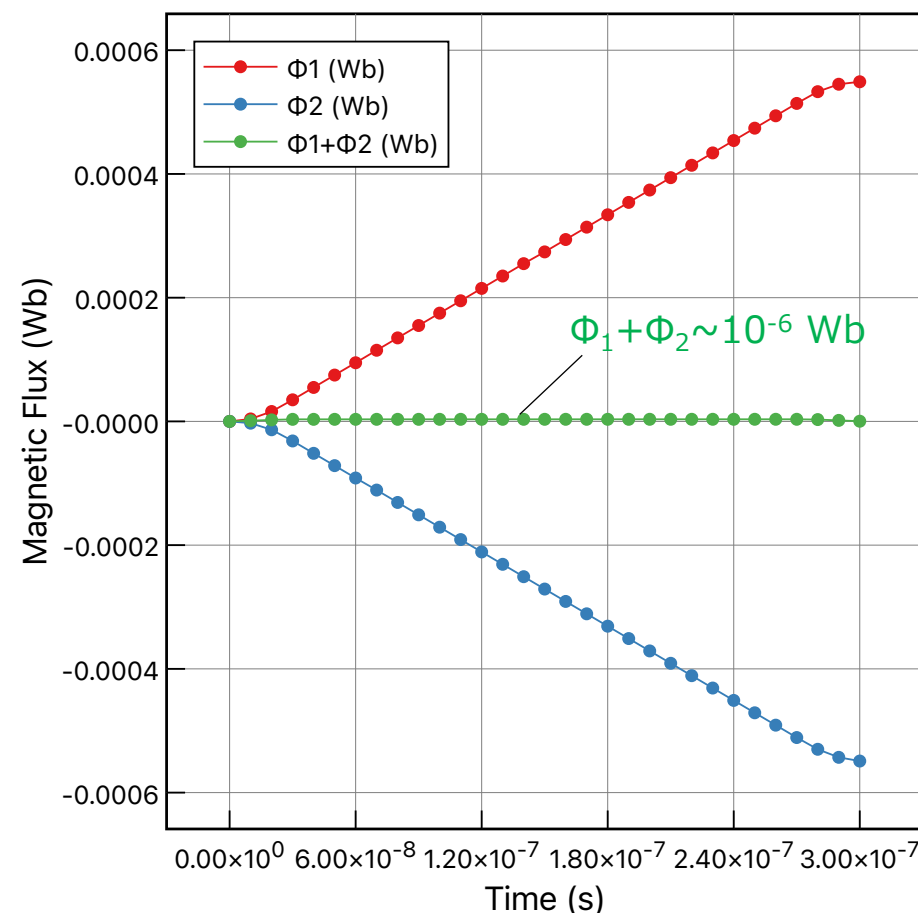
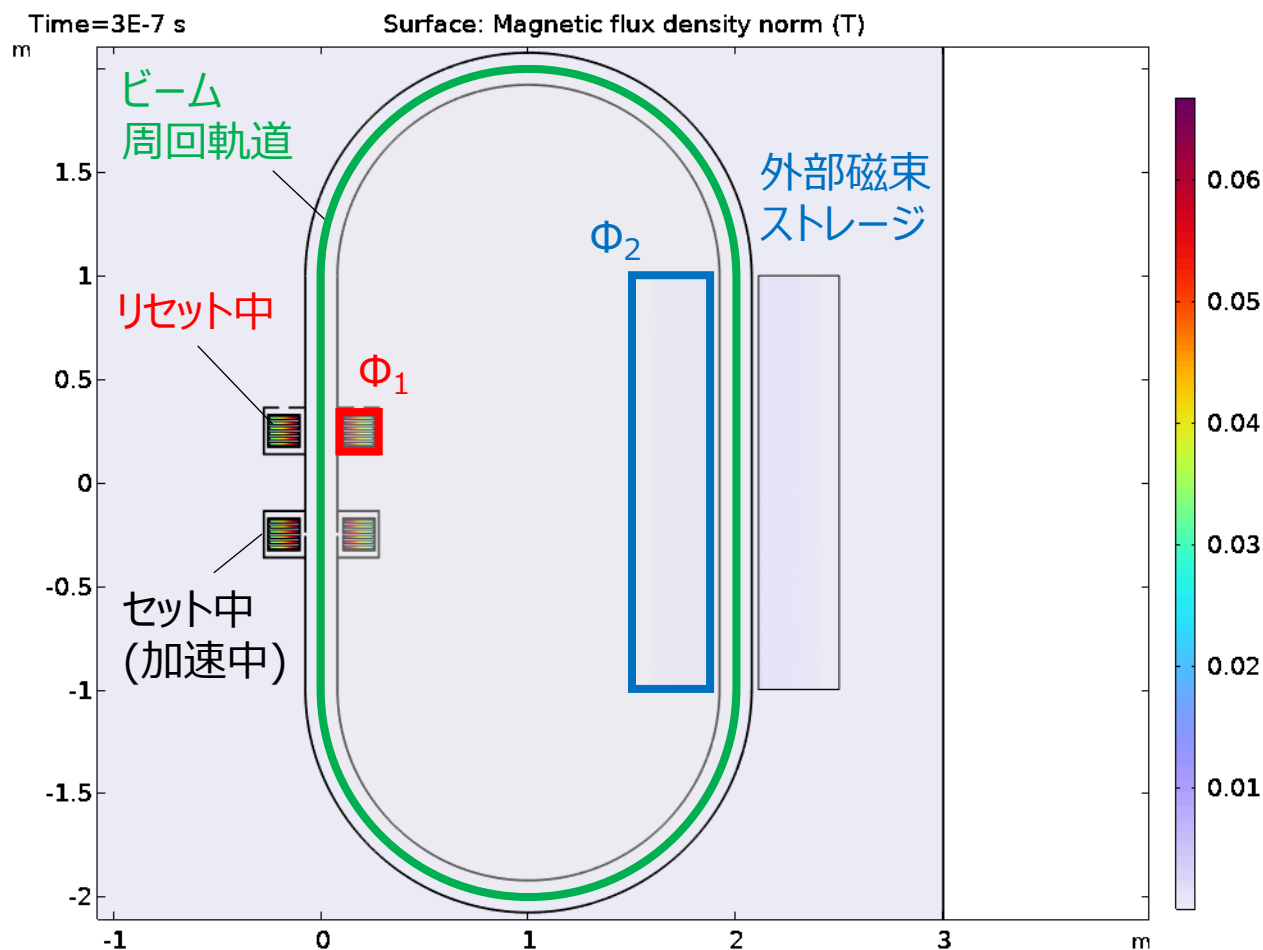
直流誘導加速器の3次元電磁場解析

- 2つの加速ギャップに交互に加速電場が発生。減速電場は十分に抑制。



外部磁束ストレージの役割

- リセット中のコアの磁束(Φ_1)は、外部磁束ストレージ内に発生する逆向きの磁束(Φ_2)によりキャンセル → リセット操作に伴う**正味の磁束変化はゼロ**。

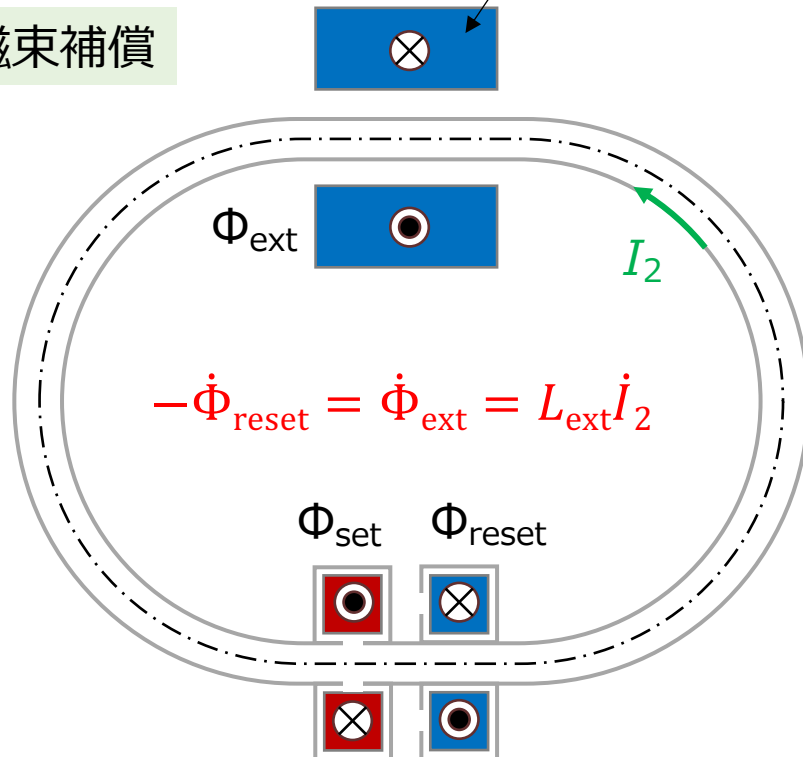


リセット磁束の補償

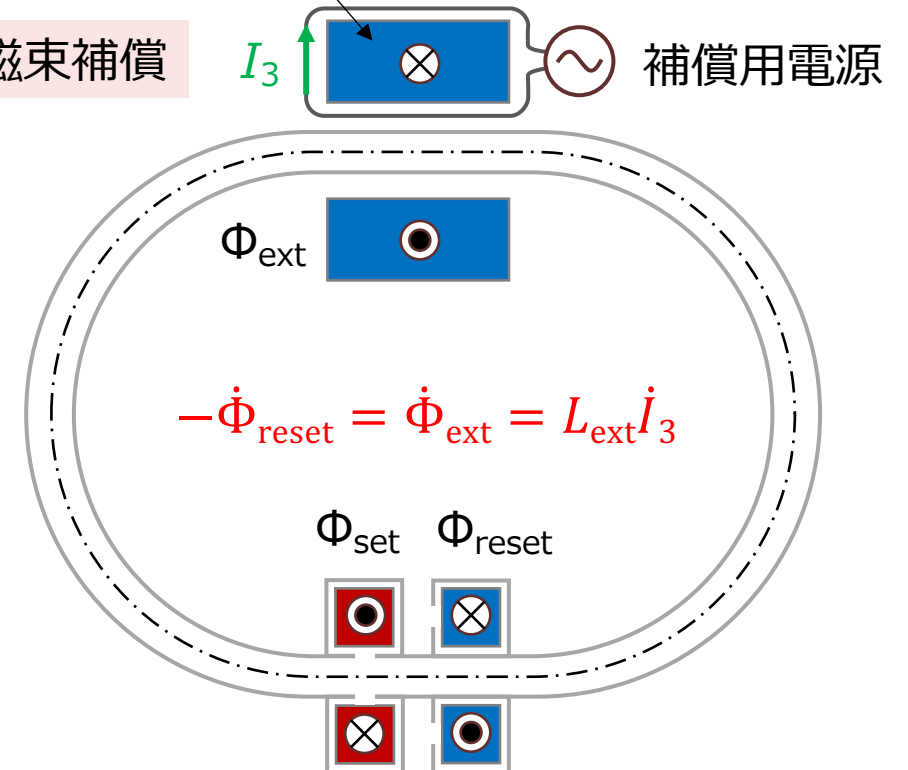
- 補償電源により外部磁束ストレージに積極的に磁束を発生させることで、ビームダクトを流れる誘導電流(I_2)をゼロにし、電磁石等への影響を回避.

直流加速中は同じ方向に磁化し続けるので、飽和する前にリセットが必要

パッシブ磁束補償



アクティブ磁束補償

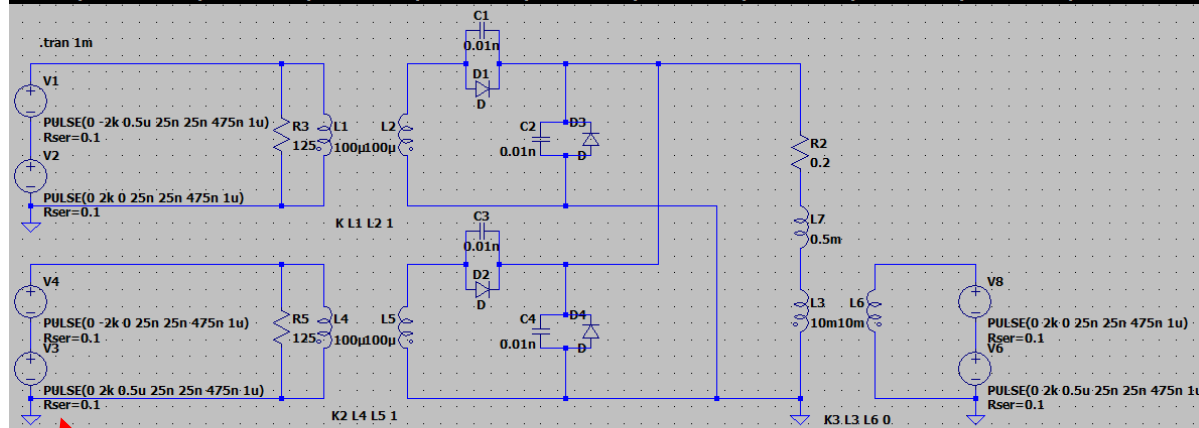
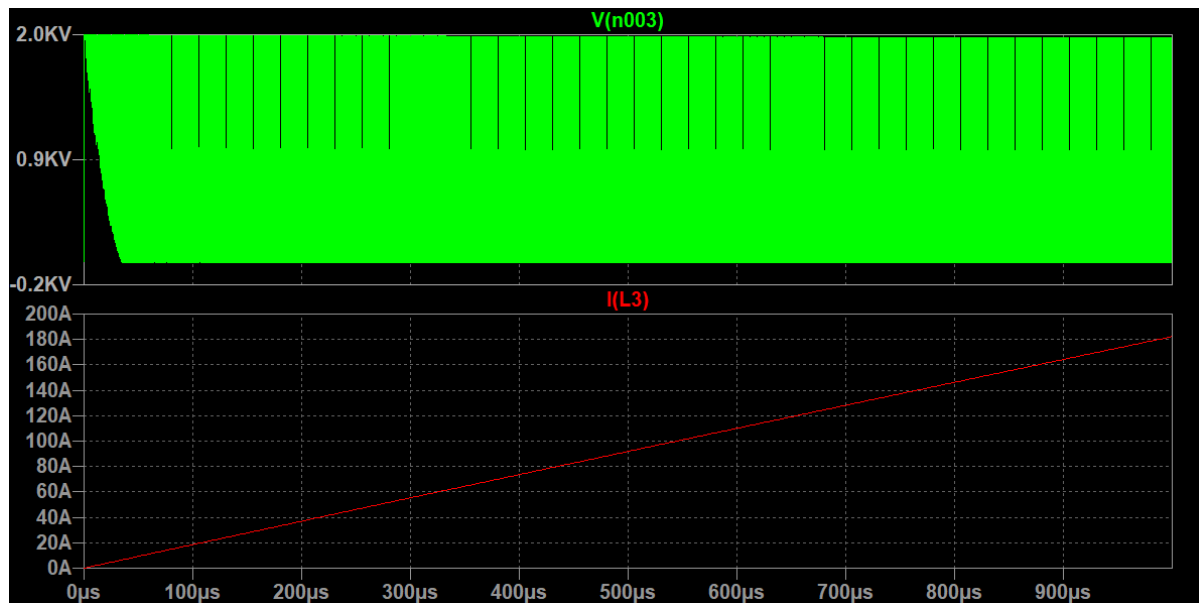


- 誘導加速器は原理的に大電流ビーム加速に適している。
- 数値解析およびモデル実験により、円形加速器における直流誘導加速の原理を実証（実機を用いた原理実証実験を今年度を実施）。
- 核融合工学分野への応用を念頭に、直流誘導加速原理を利用した大電流イオン加速器(直流誘導加速FFAG)の概念設計を進めている。
- 外部磁束ストレージと補償回路を組み込んだ線形直流誘導加速器についても検討中。

Backups

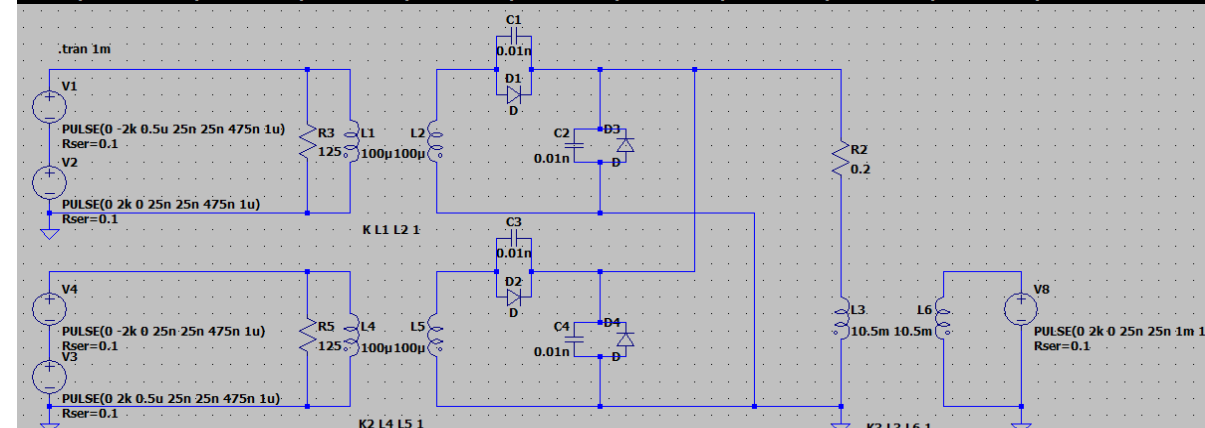
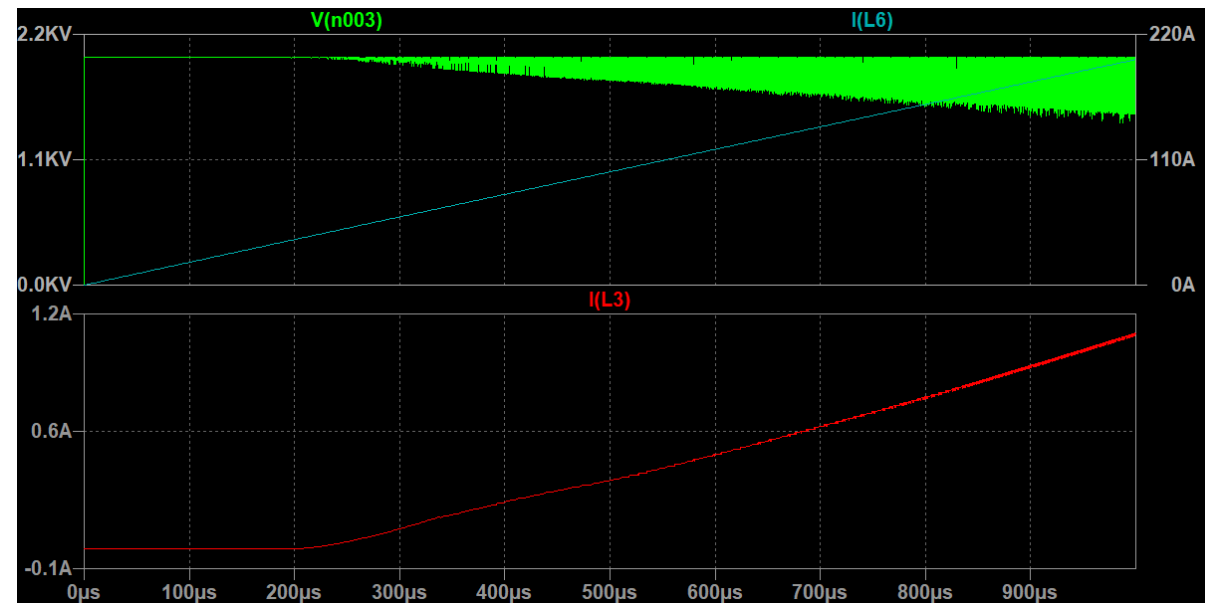
磁束補償回路によるダクト電流の抑制(LTSpice)

補償回路オフ



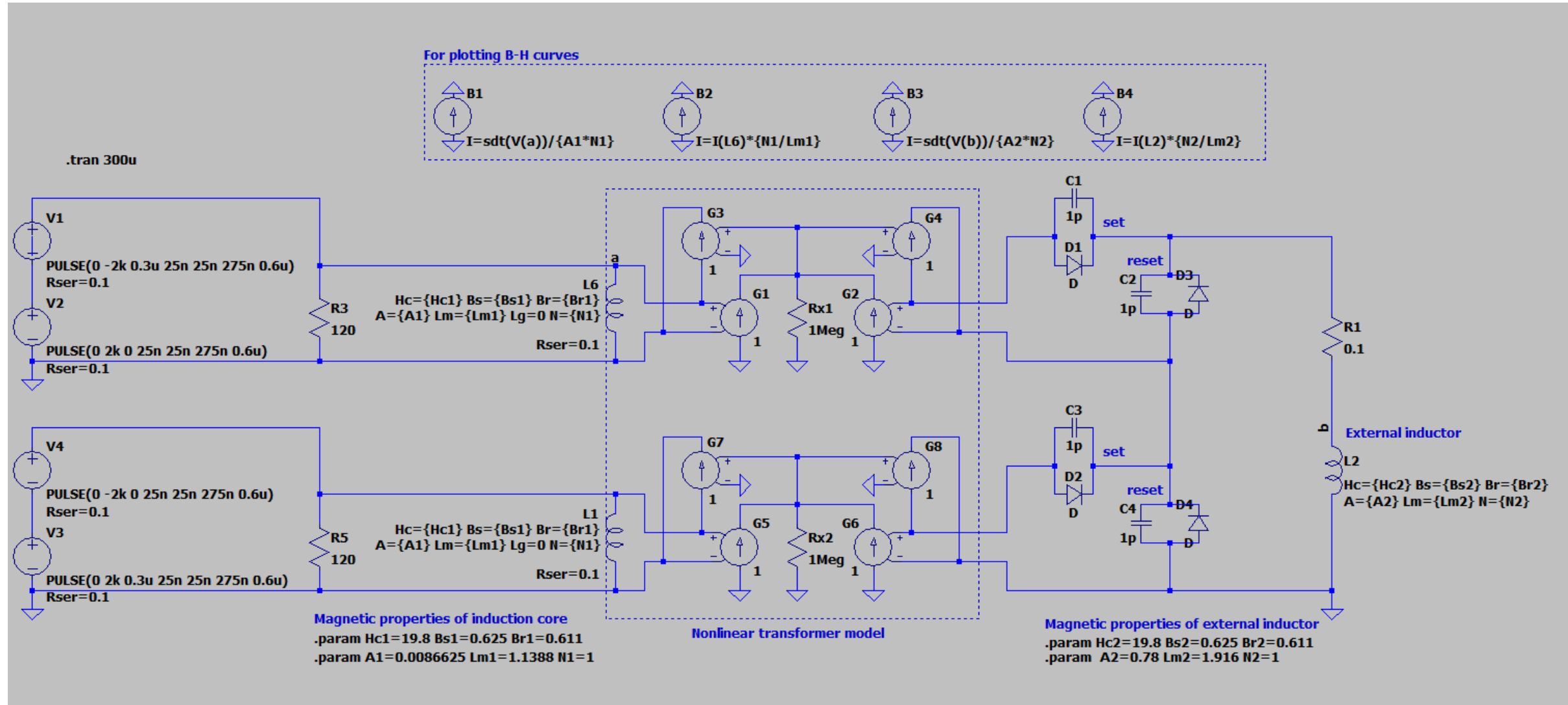
セル電源1 MHz

補償回路オン (1 kHz)



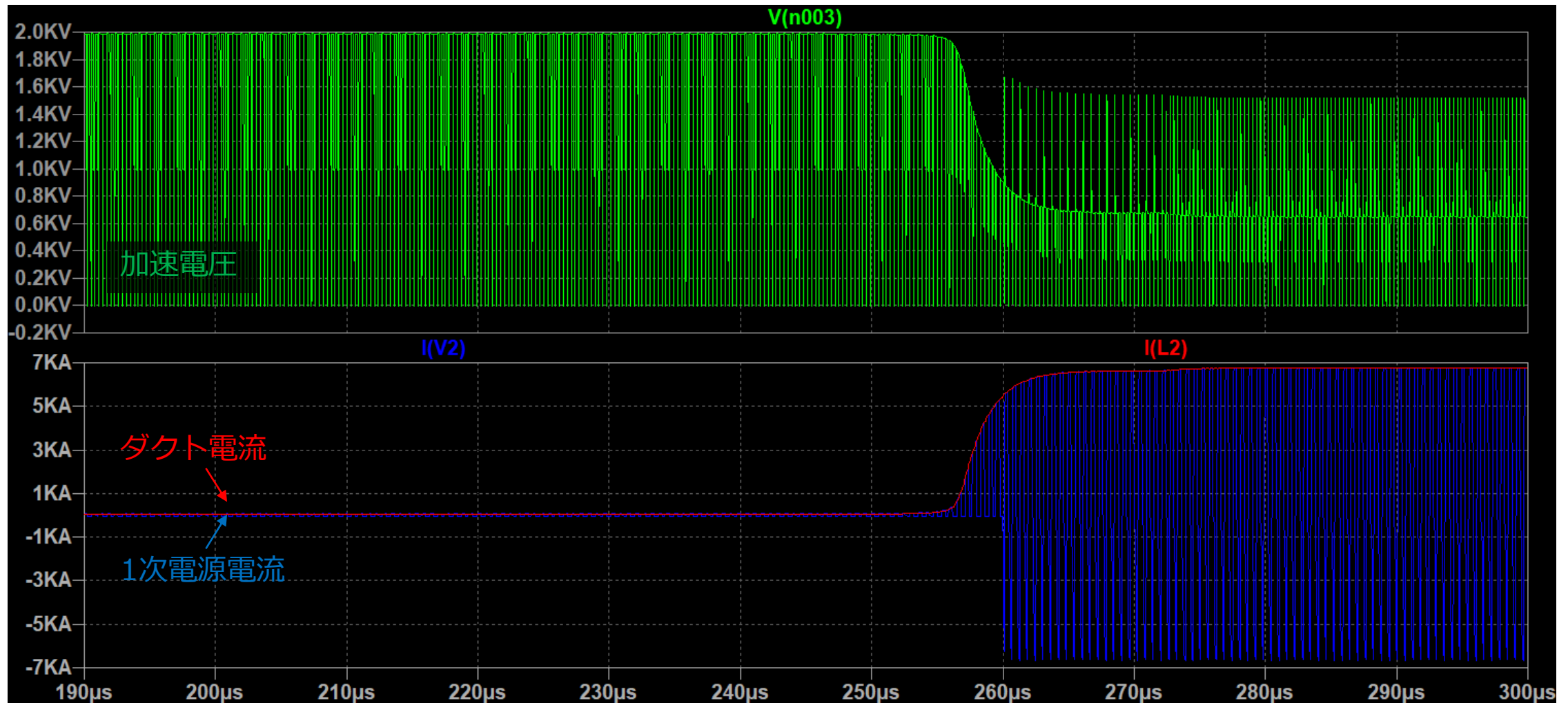
直流誘導加速器の等価回路

- 非線形トランスモデルにより磁性体コアの飽和効果を考慮.



LTSpiceによる直流誘導加速シミュレーション

- 外部磁束ストレージが飽和すると、誘導加速電圧が急速に低下。
- 直流誘導加速の連続動作時間を制限。



応用例：EUV-FEL

- ・ シンクロトロン放射およびFEL放射による**ビームエネルギー損失**を**直流誘導加速**で補填.
- ・ マイクロバンチ構造を保ちながら**直流ビーム**による**FEL発振**を行う.

