

HDL Coder™を使ったニュートリノ生成用加速器電源における電力制御法の開発

高エネルギー加速器研究機構 (KEK)

加速器研究施設

J-PARC メインリング 主電磁石グループ

栗本 佳典

目次

- ニュートリノ実験とJ-PARC加速器
- J-PARCメインリング
- J-PARCメインリング電磁石電源MATLAB®/Simulink®
- まとめ

T2K (Tokai to Kamioka) 実験と J-PARC 加速器

ニュートリノの種類が飛行中に変わる「**ニュートリノ振動¹**」という現象を利用し、ニュートリノと反ニュートリノビームを J-PARC で生成し、その両者のニュートリノ振動を比較する実験。

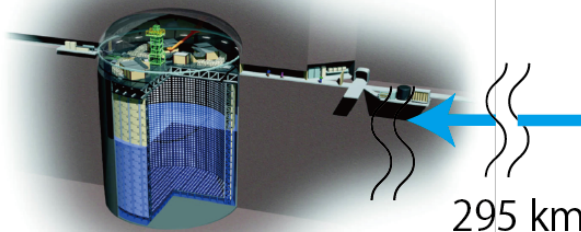
↓

反ニュートリノとニュートリノで現象が異なることを示せば、「**宇宙はなぜ物質ばかりで反物質²がほとんどないのか**」という疑問に答える手がかりとなる。示せばノーベル賞級。

1. ニュートリノ振動の発見で、東大梶田教授が 2015 年ノーベル賞を受賞

2. 電荷 (+か-) などは逆だが、質量などのその他の性質が全く同じ物質のこと。例えば、+の電荷をもつ電子同じ質量の物質「陽電子」がある。

スーパーカミオカンデ
神岡町 (岐阜県)



J-PARC 東海村 (茨城県)



米国の研究所と激しい競争の最中。先に見つけられるかどうかは、**J-PARC メインリングがどれだけ多くの陽子を供給できるかの一点に尽きる**。競争力を維持するためメインリングの増強は必須。

J-PARC = Japan Proton Accelerator Research Complex

- 陽子加速器と実験施設の共同利用研究施設
- 世界中の大学、企業から研究者が実験に集まる。
- 高エネルギー加速器研究機構 (KEK) と日本原子力研究開発機構 (JAEA) が共同で2008年に東海村の原子力科学研究所に完成。



→ **本講演はMR (メインリング) の増強計画に関すること**

J-PARC メインリング

陽子加速のしくみ

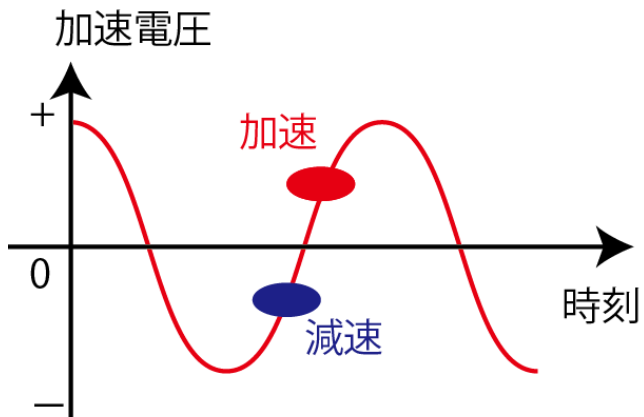
陽子はリング内を周回しながら、進行方向に電圧を発生させる「高周波加速空洞」を通過したときに毎周加速される。



ポイント1 加速電圧は交流である。ため加速電圧がちょうど+になる時しか加速できない。



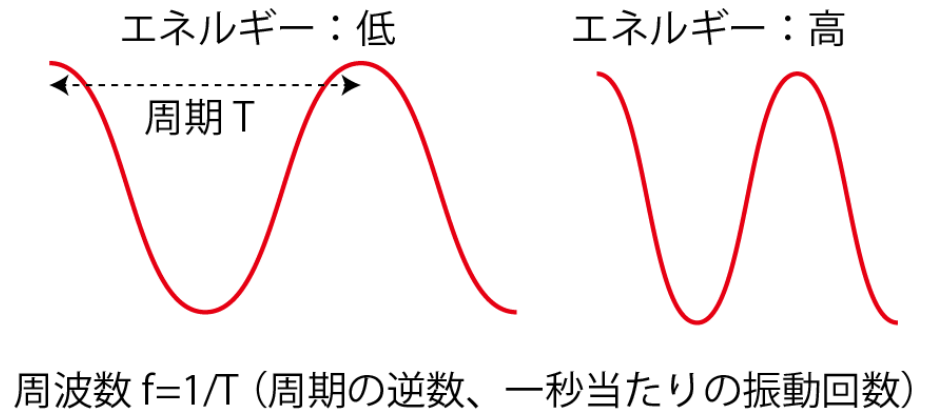
次の周回も同じ加速電圧を得るには、ビームが一周する時間は加速電圧の周期（波の山から山までの時間）の倍数になっていなければならない。



ポイント2 ビームは加速するため、周回にかかる時間がどんどん短くなっていく。



次の周回も同じ加速電圧を得るには、加速とともに加速電圧の周期を短くする必要がある。

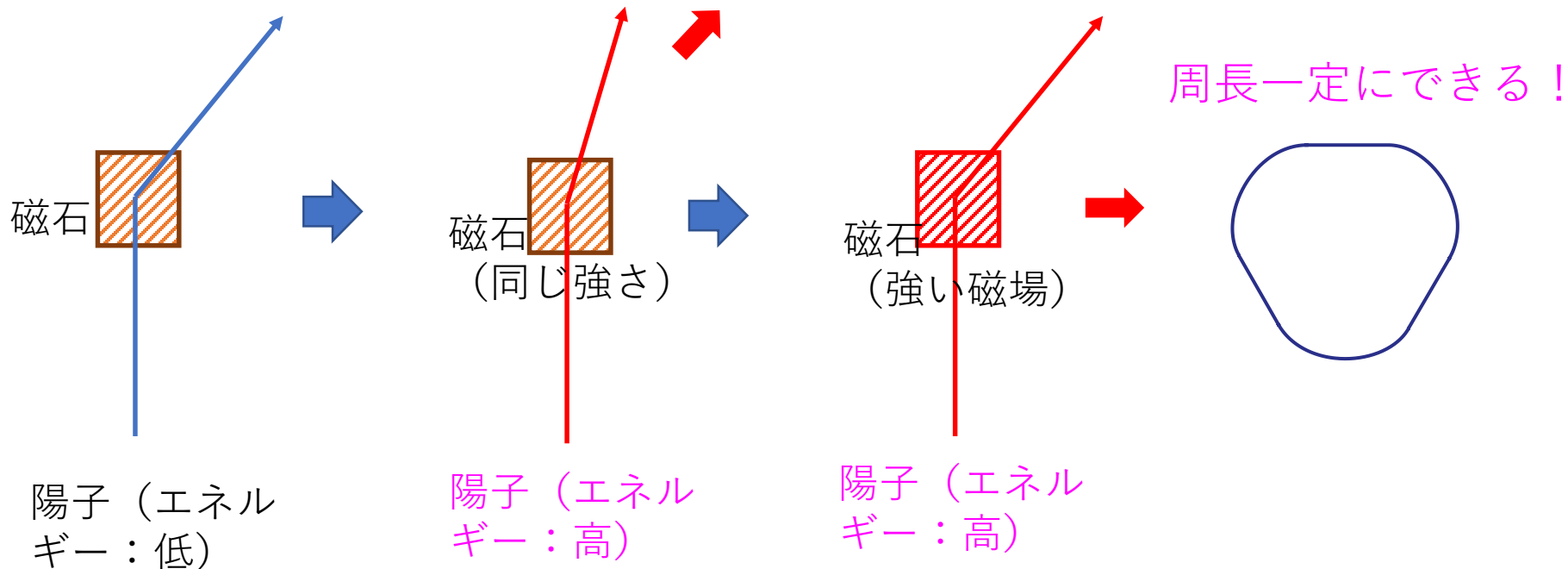


陽子の軌道制御のしくみ

メインリングでは粒子を周回させるため**電磁石**を使って粒子を曲げている。もし磁石の強さが同じだと粒子のエネルギーが高いほど曲がりにくくなる。



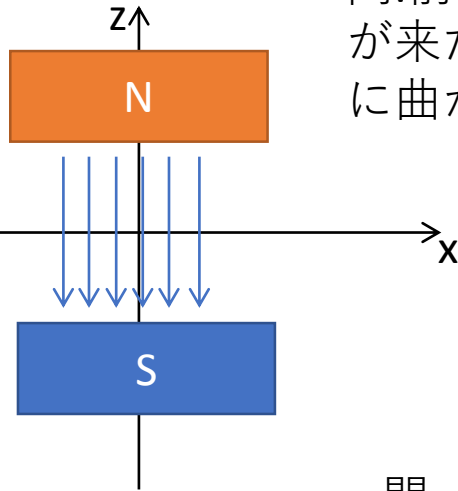
もし磁場の強さが一定だと、加速とともに周長が増えていく。



陽子の加速に同期して電磁石を強くする制御が必須

電磁石の例

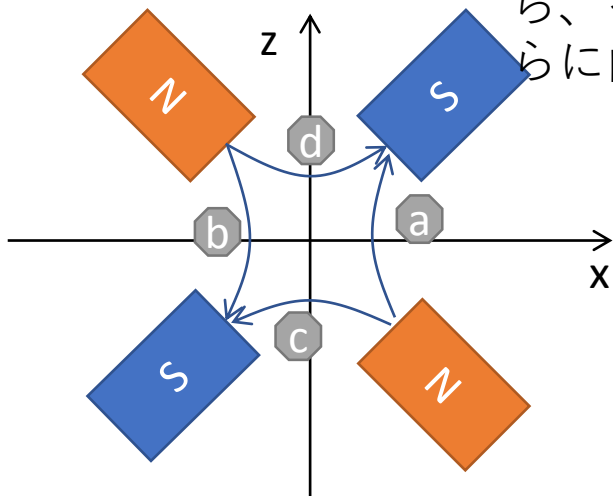
偏向電磁石



問:前から陽子が来たらどちらに曲がるか?

問:a,b,c,dの位置に前から陽子が来たら、それぞれどちらに曲がるか?

四極電磁石

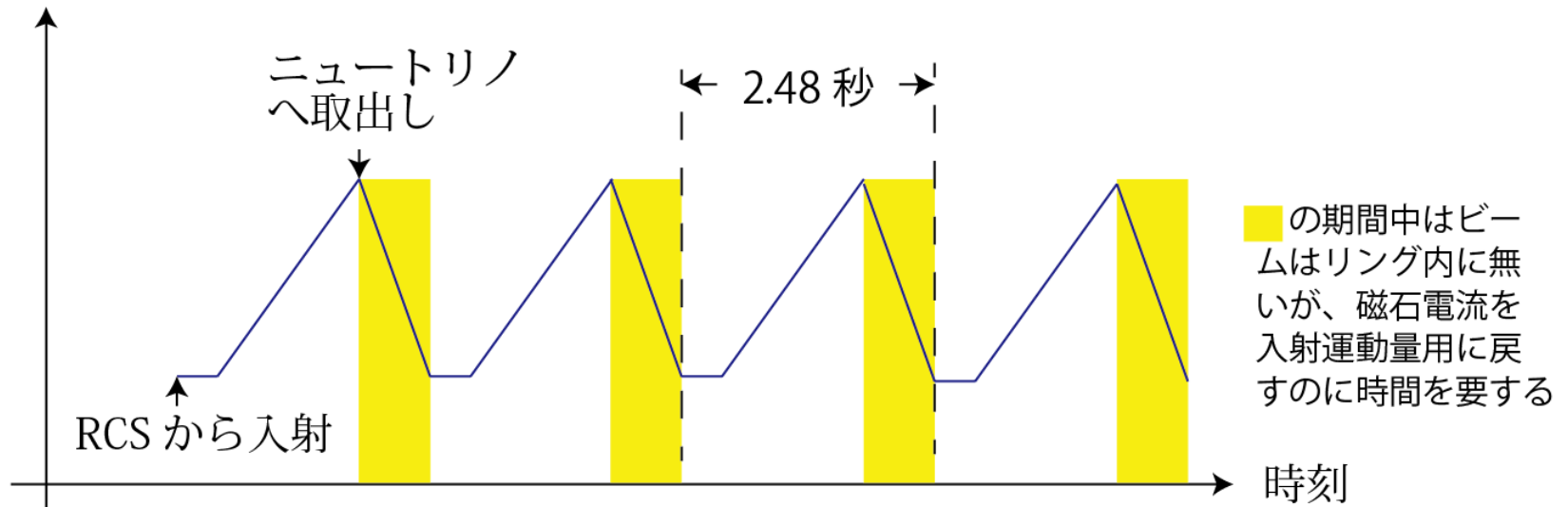


J-PARC Main Ring では、これらの偏向電磁石や四極電磁石などが規則的に並んでおり、ビーム軌道を制御する役割を果たす。

ビーム供給と供給量増強計画

メインリングからのビーム供給

陽子運動量
 \propto 電磁石電流

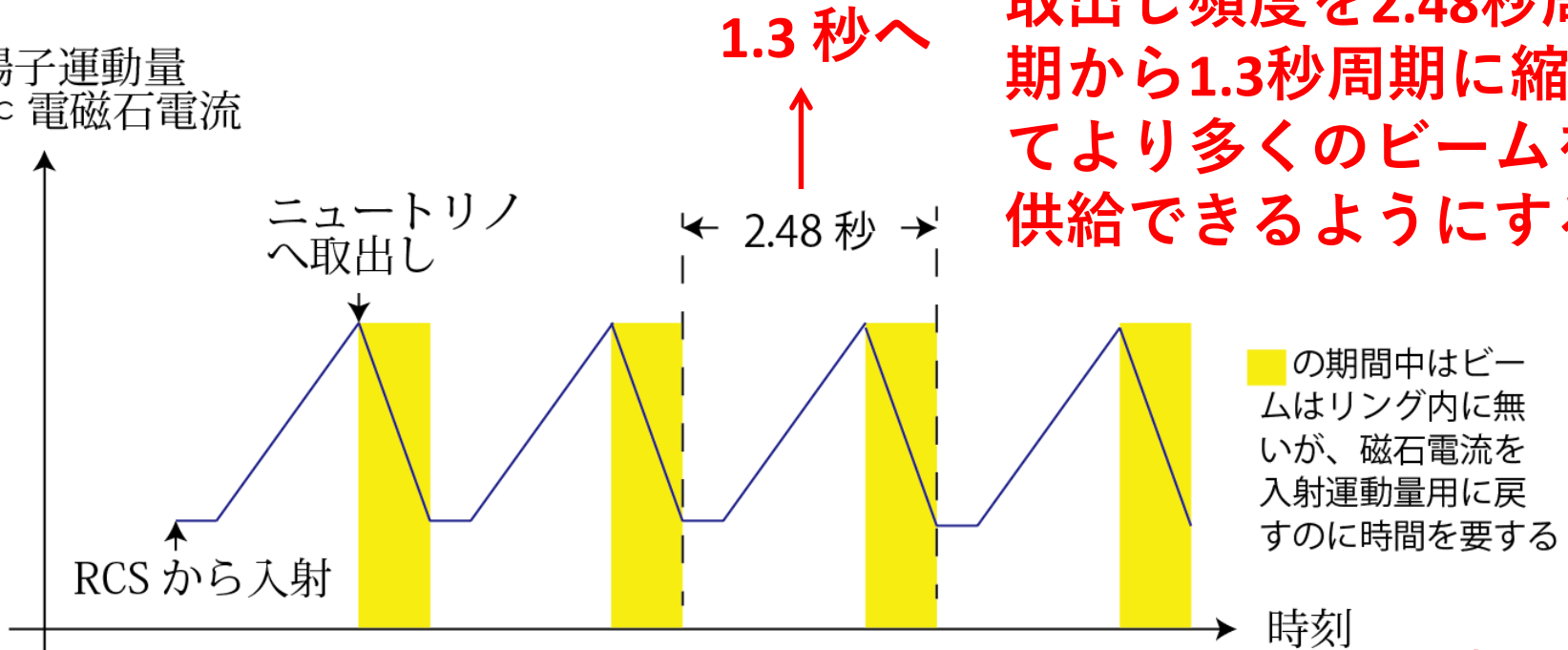


$$V(\text{磁石に印可する電圧}) \propto \frac{\Delta I(\text{電流の変化量})}{\Delta T(\text{変化にかかる時間})}$$

ビーム供給と供給量増強計画

メインリングからのビーム供給

陽子運動量
 \propto 電磁石電流



取出し頻度を2.48秒周期から1.3秒周期に縮めてより多くのビームを供給できるようにする。

$$V(\text{磁石に印可する電圧}) \propto \frac{\Delta I(\text{電流の変化量})}{\Delta T(\text{変化にかかる時間})}$$

半分に!
←

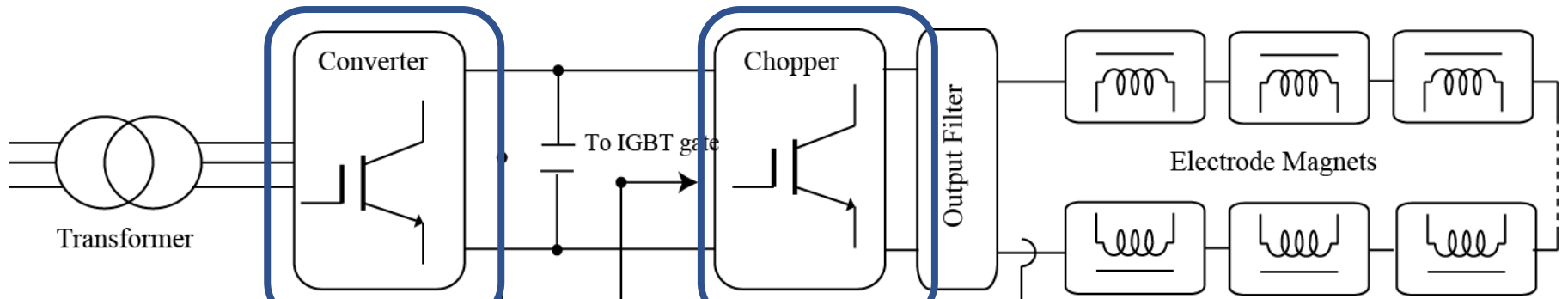


磁石に印加する電圧を約二倍にする必要がある。
つまり、二倍の出力の電源が必要

J-PARCメインリング電磁石電源 とMATLAB/Simulink

メインリングの電磁石電源

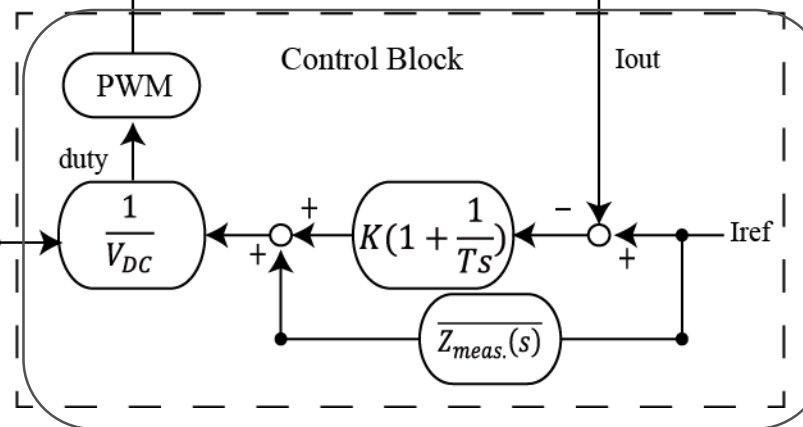
メインリングの電磁石電源は1 MW～10 MWのIGBTなど大型半導体素子を使用した電力変換器である。



パワーユニット



産業利用されている
(電車など) のものと
同スペックで充分



電力変換器は制御も含めて扱われるため、従来はすべての設計を総合電機メーカーに発注

制御システム



ビーム制御特有のもの
の高精度制御、パ
ターン制御など

直面した困難

通常：要求性能を仕様とした競争入札で、メーカーに開発と製造を委託

今回：従来方法で購入できず。



具体的には...

大手メーカー

- 辞退
- 超高額見積もり

それ以外のメーカー

- 電力容量が大きすぎる
- デジタル制御技術者がいない。

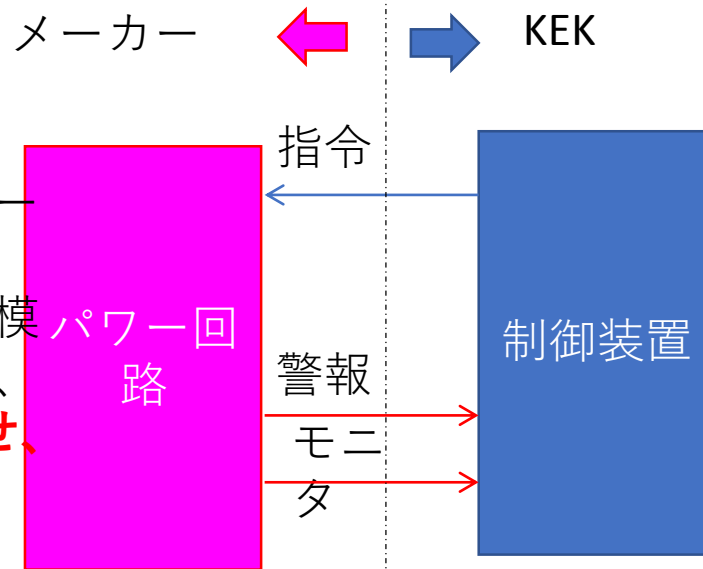
開発体制

メーカーとKEKで分担、協力して開発、設計を行う。

- 電源の高精度デジタル制御は仕様から外した → 制御装置はKEKで準備

パワー回路

- 設計、製造はメーカー
- ただし、メーカーにとっても初めての規模のパワー回路なので、**KEKの職員を常駐させ、共同で開発を行う**



制御装置

- 制御アルゴリズムはすでに開発済み
- 電気設計やソフト設計はKEK職員が担当
- 構造設計や板金、組み立てのみを外注

グループ構成（計六人）：

研究職員（理学博士）：リーダー（36歳 私）メンバー3人（35歳 二人と33歳）

技術職員：一人（29歳）

業務委託：一人（40歳）

電源開発グループの歴史

2010年：制御ロジックを検討し、メーカーに提案

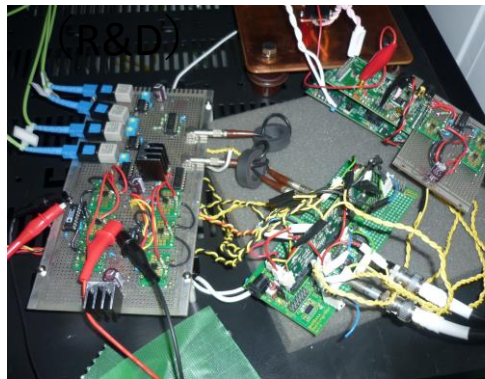
2011年：ミニモデルを自作し、実際に制御ロジックを実験し、メーカーに提案

2013年：電流制御部（AD基板、FPGA,DSPボード、ソフトウェア）を設計、製造し、メーカーに支給

2014年：制御盤ごと設計、ただし、電力制御部、インターロック受信部はメーカーから支給を受ける

2015年：制御盤すべてを設計、製造（ソフト、ハードともに電源メーカーからは切り離す）

2011



2013



2014



2015

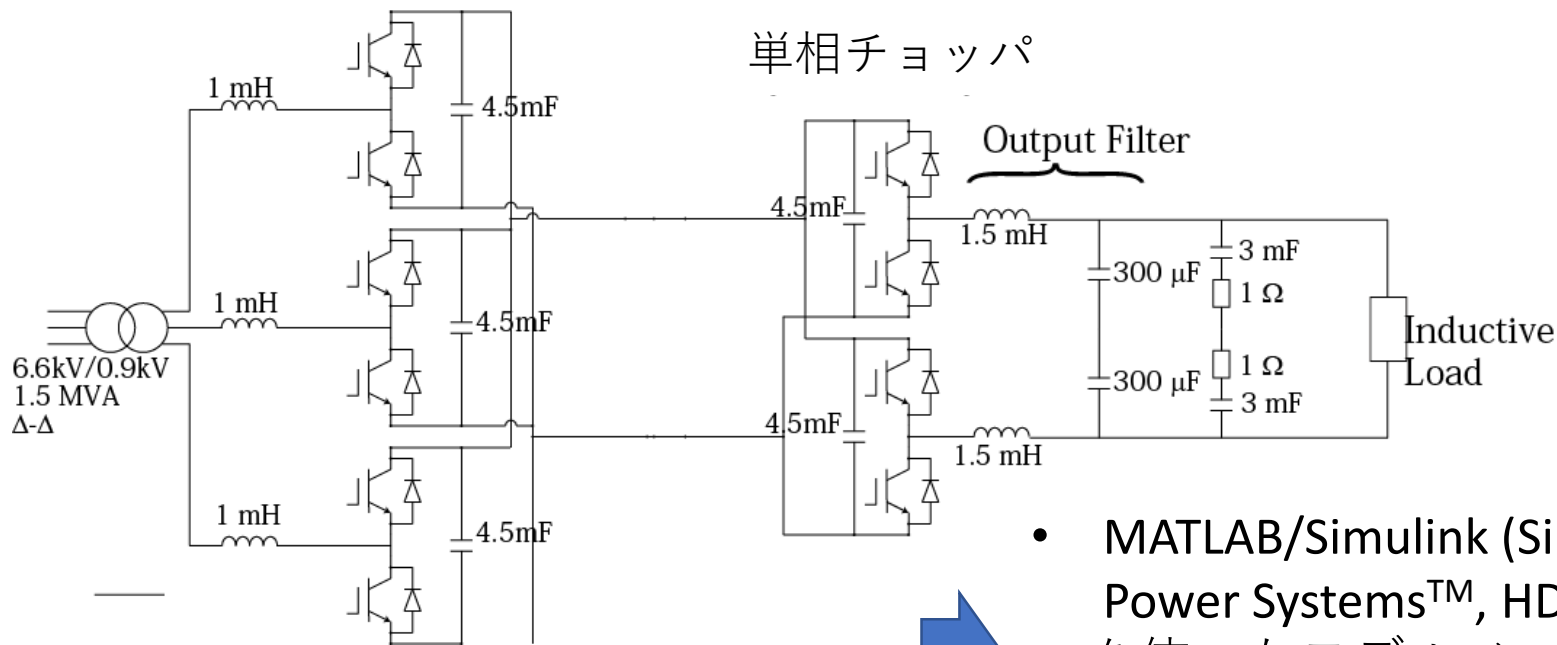


メリット：研究職員が電源を完璧に理解。→メンテや改造が高速で安価に

リスク：加速器と関係のない要素も研究職員の責任（インターロック、電力制御）

J-PARC 新電磁石電源一号機の仕様

3相AC/DCコンバータ



Input AC Voltage : 6.6 kV
Number of Phases : 3
Input AC Current : 116 A
DC Voltage : 1700 V
Output Voltage : 1050 A
Circuit Type : **3Phase AC/DC IGBT Converter**
+ Single Phase Chopper
Switching Frequency : 1 kHz

- MATLAB/Simulink (Simscape™ Power Systems™, HDL Coder) を使ったモデルベース設計
- 三相AC/DCコンバータ制御にのみ HDL Coderを使用した*

* チョッパ制御は加速器に重要な高精度制御のため、以前からR&Dを進めていた。一方AC/DCは、メーカーに任せる予定だったので、急遽独自に設計する必要があった。

J-PARC 新電磁石電源一号機の実際の大きさ



モデルベースデザイン

1. MATLAB/Simulink (Simscape Power Systems, HDL Coder)によるシミュレーションの反復
 - HDL Coderを使わないシミュレーションと使うシミュレーションで結果が変わらないことを確認
 - 制御パラメータ (PI制御など) のあたりを付ける
2. 小型R&D用電源による試験
 - 各種波形がシミュレーションと一致していることを確認
3. 実機による試験

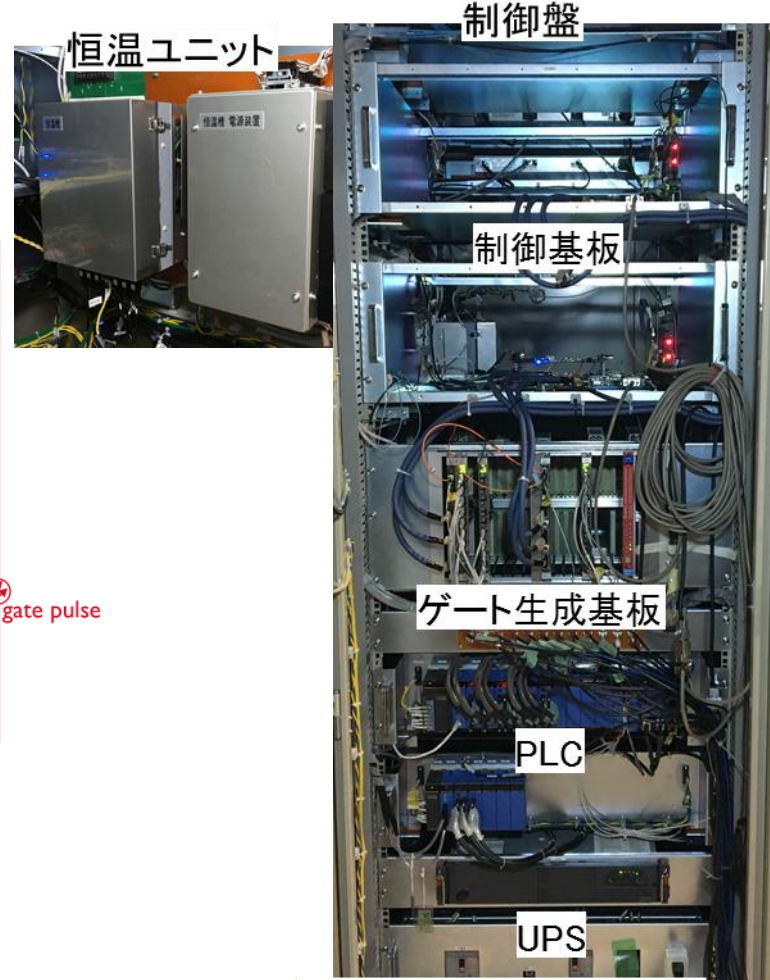
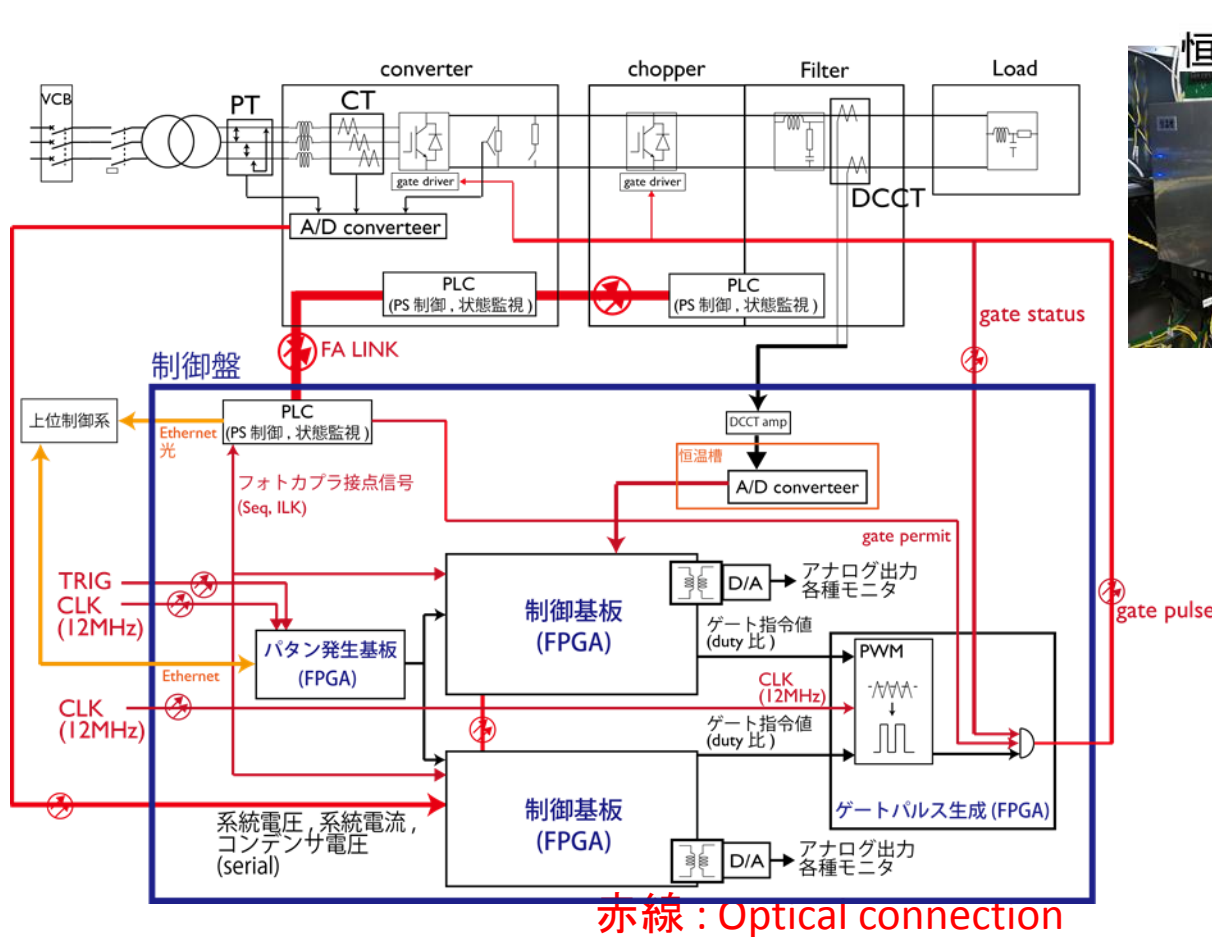
今までの我々の開発：回路や制御の検討とコード実装は独立

→ **2の小型電源の試験で初めて発見されるバグ多数。**

今回の開発：**小型電源の試験は確認作業程度**

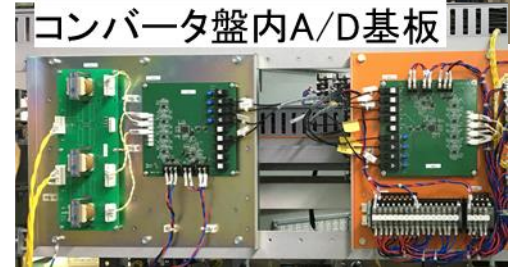
開発期間は1か月
×1人程度
(従来方式の半分以下)

KEK設計電磁石電源制御システム

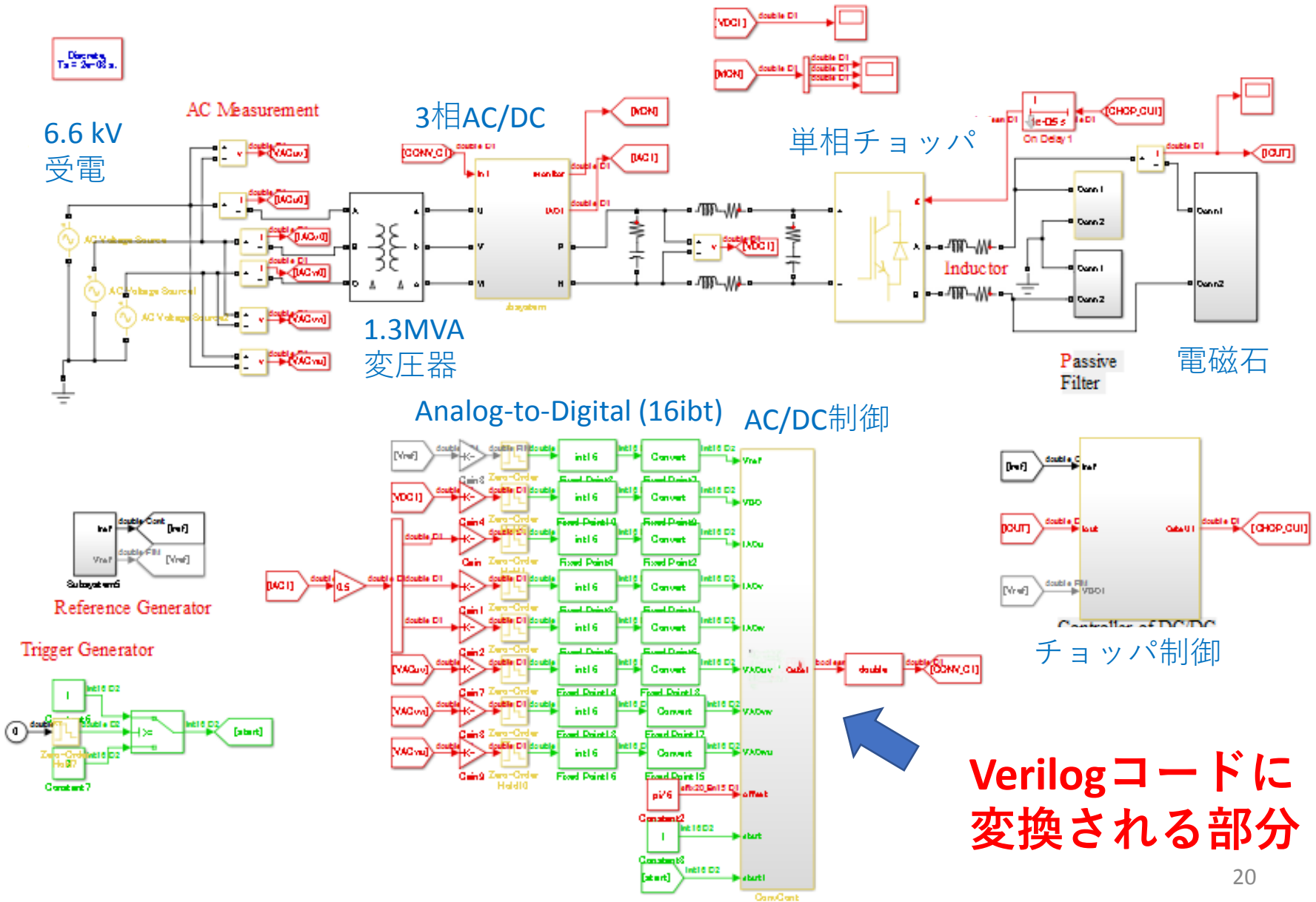


制御部構成

- ✓ 主回路-制御間を絶縁 (DCCT head-amp間のみ電気信号)
- ✓ Full FPGA 制御システム : 膨大な入出力に対応, タイミング制約



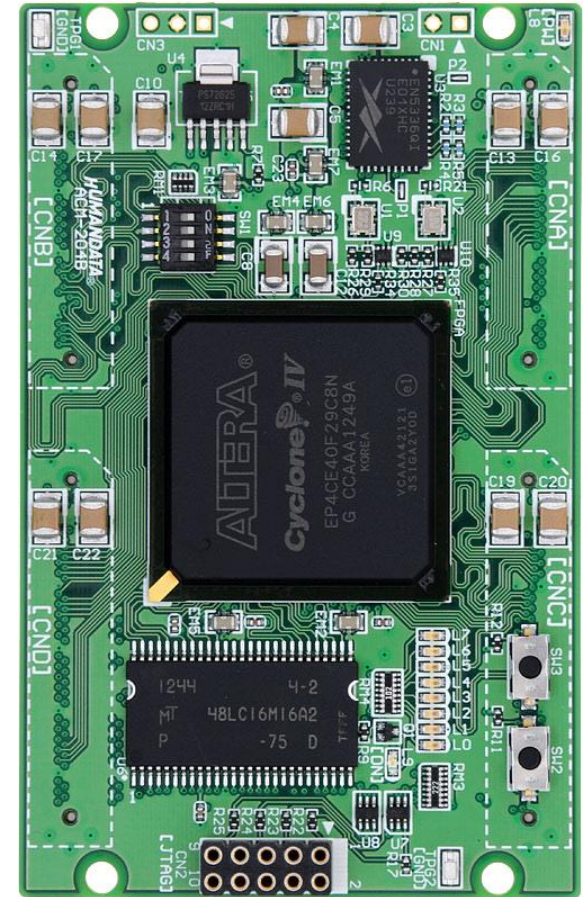
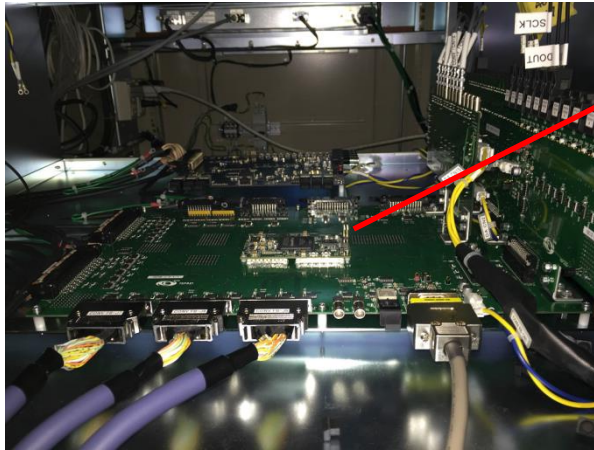
Simulink モデル (Top View)



3相AC/DCコンバータのコントローラ

コントローラーの役割

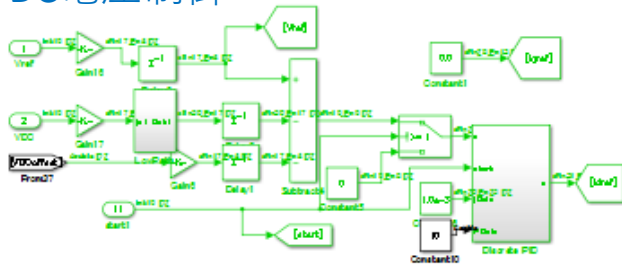
- 連続位相PLLによる系統同期信号
- “uvw” to “ α - β ” 変換
- “uvw” to “d-q” 変換
- “d-q” to “uvw” 変換
- DC電圧, 有効電力および無効電力のPI制御



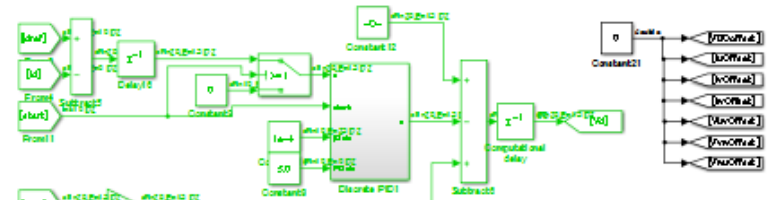
HUMANDATA ACM-204-115C8
(Altera Cyclone 4 EP4CE115F29C8N)

Simulink モデル (Verilog変換要素)

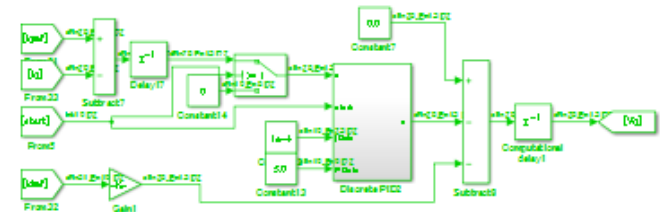
DC電圧制御



有効電力制御



無効電力制御



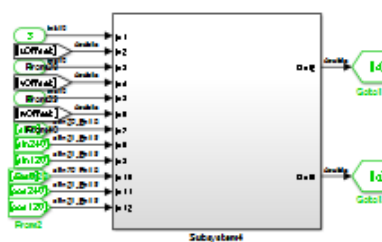
uvw→dq (電圧)



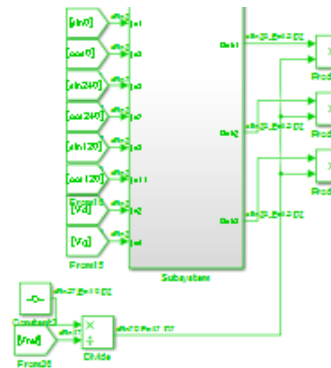
連続位相PLL



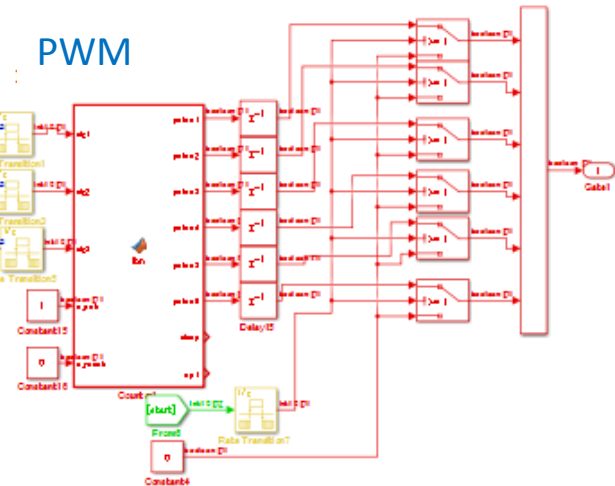
uvw→dq (電流)



dq→uvw (電圧)



PWM

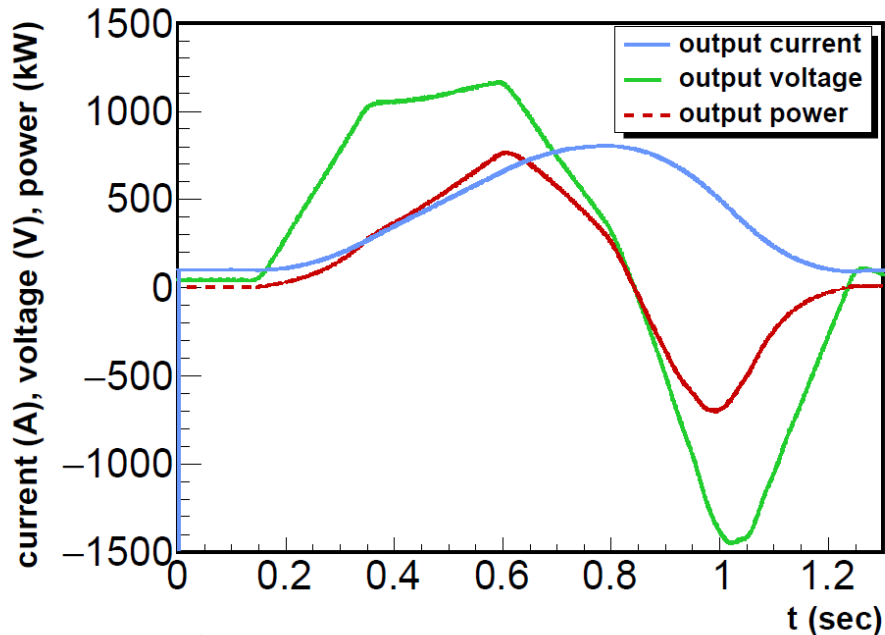


HDL Coderを使ってみて

- 他のパッケージ（Simscape Power Systemsなど）との連動したモデルベース設計は強力
- 実際の電源の動作はほぼシミュレーション通り、ずれは回路定数（R,L）の誤差起因
- HDL CoderはHDL（ハードウェア記述言語）に慣れた人向けに感じた。（私はHDLを日常的に使う）
- 浮動小数点数に対応してほしい（今のバージョンは対応している）広いダイナミックレンジで、追加の設計なしで、今後の定格が異なる電源に対応するため
- 保守費用が高価

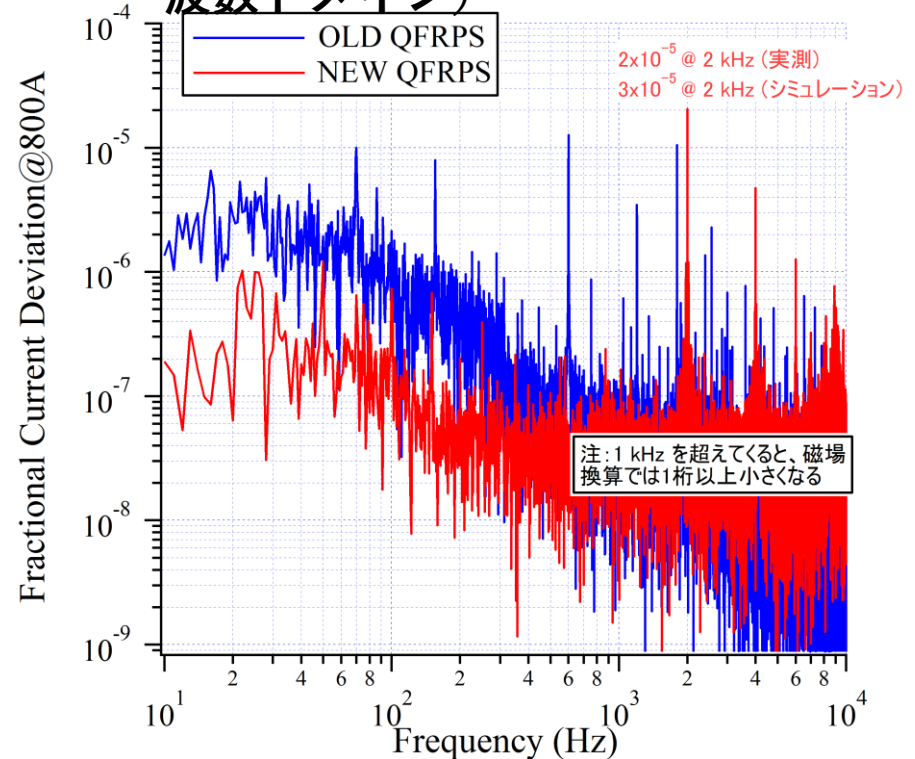
新電磁石電源1号機の試験結果

出力電流、電圧および電力



➡ 1.3秒パルスパターン
の出力が可能に

新旧電源の電流エラーの比較（周波数ドメイン）



➡ 一桁近い出力精度向上

2.48秒*繰り返して、一年間の連続運転に成功！！

*すべての電磁石電源を1.3秒対応にするまでは、加速器として1.3秒運転はできない。

まとめ

- ニュートリノ振動実験は、物質と反物質の非対称の謎にせまる重要な実験
- 日米の国際競争は激しい
- J-PARCメインリングがニュートリノを生成する陽子の供給量が勝敗のカギ
- そのためには電磁石電源の増強が必要
- それを予算内で実現するための開発チーム結成
- **MATLAB**の活用で、新電源一号機を早期に完成
- 大手メーカーの見積と比較して**60%**のコストダウン
- 開発期間は半分以下に（一人×一か月）
- 加速器の性能向上のために、あと**10**台は必要

最後に

- 加速器研究所としては電源開発チーム立ち上げは苦渋の決断
- 本来はメーカーさんがやるのが良い
- **MATLAB**のような強力なモデルベース設計ツールを使えば誰でも挑戦できるはず
- 近年、日本メーカーが海外メーカーと入札で負ける案件が出始めている



是非とも新しいことに挑戦し、国際競争力の維持を