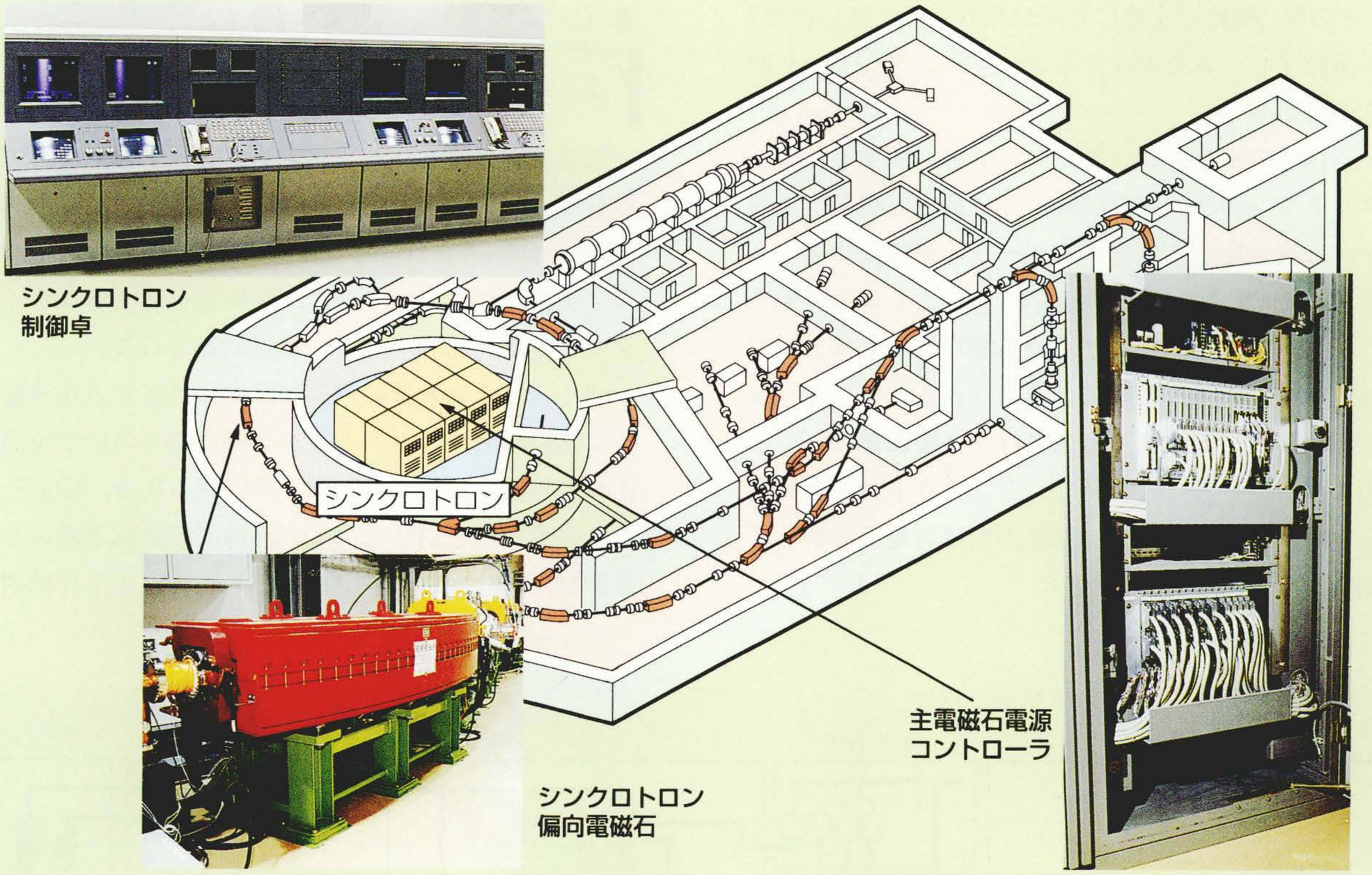
加速器用電磁石電源同期・繰返し制御

Synchronized and Repetitive Control of the Main Magnet Power Supply for Accelerators

高田栄一* Eiichi Takada　松本 啓*** Satoru Matsumoto　森山國夫***** Kunio Moriyama
佐藤健次** Kenji Satô　中山尚英**** Takahide Nakayama



科学技術庁放射線医学総合研究所での重粒子線がん治療装置“HIMAC”(電磁石電源同期・繰返し制御システムを適用)
シンクロトロン(主加速器)の主電磁石電源運転にこの制御システムを適用し，大幅な省力化と稼動率向上が可能となった。

高エネルギーの陽子線や重粒子線を生成する加速器は，医療・研究用としてその重要性が増している。性能の良い加速器を実現するには，電磁石の発生する磁場精度が高いことが前提となる。最近，医療用に注目されている陽子線や重粒子線シンクロトロンでは，ビーム損失低減のため，特に良好な磁場精度が要求される。さらに運転員は，多様な治療対象に最適なビームエネルギーや粒子種別などへの変更操作を頻繁に行う。したがって，稼動率を向上させるためには，精度の良い運転パターンを得る微調整(トラッキング調整)が容易でなければならない。

このようなニーズにこたえるために，シンクロトロンの周期的な繰返し運転に着目した加速器用電磁石電源同期・繰返し制御システムを開発し，科学技術庁放射線医学総合研究所の重粒子線がん治療装置“HIMAC(Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba)”に適用した。

このシステムでは，トラッキングがとれた，精度の良い運転パターンを自動的に得ることができるため，大幅な省力化が実現され，施設の高稼動率に寄与することができる。

*科学技術庁放射線医学総合研究所 理学博士　**大阪大学核物理研究センター 理学博士　***獨協医科大学医学部教養医学科物理学教室 理学博士
****株式会社日立情報制御システム 技術士(電子応用部門)　*****日立製作所 大みか工場

1. はじめに

医療用あるいは研究用加速器の中で，シンクロトロンは，治療目的に合わせてビームエネルギーが変更できる特徴を持っているため，近年数多く採用されている。特に医療分野では，がん治療効果に優れた性質(体内深部で治療効果が高くなるプラッグピーク特性，大きい生物効果比，その他，細胞の状態に効果が左右されにくい性質)を持つ重粒子ビームを生成する重粒子シンクロトロンが注目されている[1)]。

ビーム損失の少ないシンクロトロンを実現するには，シンクロトロンのリングを構成する主電磁石が発生する磁場が，加速に応じて変化するビームの運動量に精度よく追従する(トラッキングがとれている)ことが不可欠である。一方，医療用加速器では，多様なビームエネルギーや強度への変更操作が頻繁に要求されるため，トラッキング調整を短時間でかつ容易に行う必要がある。

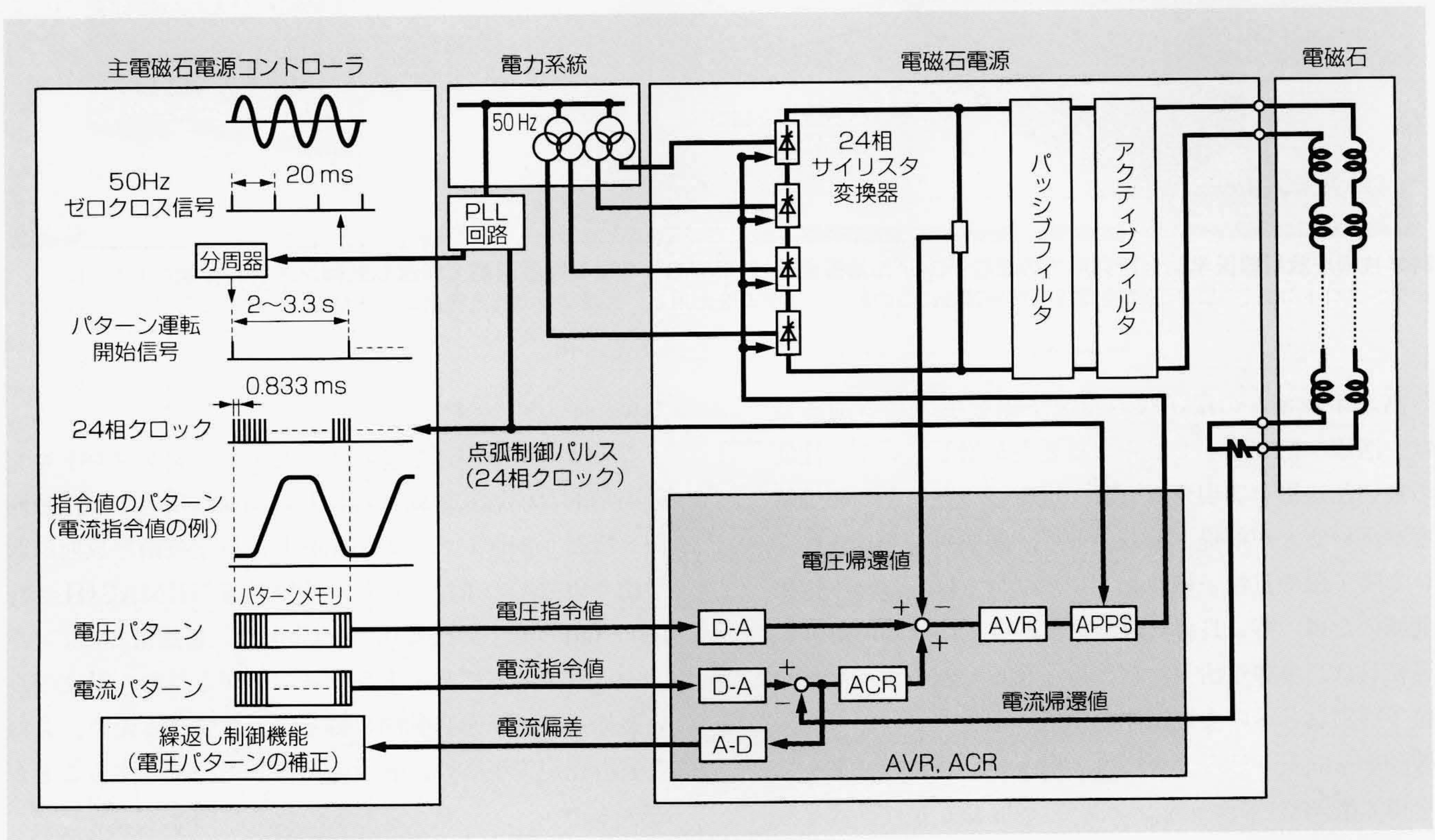
このようなニーズにこたえて，シンクロトロンの周期運転という特徴を生かした加速器用電磁石電源同期・繰返し制御システムを開発した。

ここでは，科学技術庁放射線医学総合研究所の重粒子線がん治療装置“HIMAC(Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba)”の主加速器への適用例について述べる。主加速器は，ライナックから核子当たり6 MeVのエネルギーで入射された重粒子を，治療内容に応じて核子当たり最大800 MeVまで加速するシンクロトロンである。シンクロトロンの主電磁石(偏向電磁石，集束・発散四極電磁石)にこの制御方式を適用した。

2. シンクロトロンの同期制御

主電磁石電源とコントローラの構成を**図1**に示す。電磁石は，2～3.3 s周期の電流パターンで，高精度(10^{-4}オーダー)に励磁されなければならない。電源は24相サイリスタ変換器で構成しており，変換器を構成するサイリスタアームは0.833 msごとに点孤制御される。

サイリスタ変換器の点孤制御動作は電力系統波形と密接な関係があり，コントローラ側の個々の指令値出力動作が変換器の点孤制御動作と非同期の場合，繰返し運転ごとの再現性が期待できず，高精度の励磁運転のための微調整，特に次章に述べる繰返し制御による自動調整は



注：略語説明　PLL(Phase-Locked Loop)，AVR(自動電圧調整器)，ACR(自動電流調整器)，APPS(自動パルス移相器)
D-A(Digital-to-Analog)，A-D(Analog-to-Digital)

図1　主電磁石電源とコントローラの構成
主電磁石電源コントローラは，所定の電流指令値とそれを実現するための電圧指令値を電源に同期して出力する。

困難である。このシステムでは，サイリスタ変換器を精密に制御するために，点孤周期ごとに指令値を用意し，時系列データを構成する個々の指令値とサイリスタアームとの対応を常に一定とする電源同期制御を導入した。

(1)　2～3.3 sごとのパターン運転開始信号を，電力系統の特定相のゼロクロス信号(50 Hzの場合，20 ms周期)を分周して生成し，指令値出力動作と電力系統波形を同期させる。

(2)　サイリスタ変換器のAPPS(自動パルス移相器)は，PLL(Phase-Locked Loop)回路により，電力系統に同期した点孤制御パルスが与えられる。この点孤制御パルスを制御装置に対する制御クロック割込みとし，電流・電圧パターンを内蔵する主電磁石電源コントローラの指令値出力動作と電源の点孤制御動作(0.833 ms周期)を同期させる。

以上の同期制御導入により，シンクロトロンの制御装置・電磁石電源・電力系統間の同期運転が可能となり，シンクロトロンを高精度に運転するために必要な，高い再現性を実現することができた。

3．繰返し制御

繰返し制御による電圧パターンの自動補正を**図 2** に示す。繰返し制御は，要求磁場パターンから決まる電流パターンを実現するため，電圧パターンを自動補正するものである。

主電磁石電源の励磁制御は，電圧制御と電流制御を組み合わせて行う。要求磁場パターンが決まれば，必要な電流パターンや電圧パターンは，電磁石特性を基にあらかじめ計算することができる(運転パターン生成機能)。主電磁石電源は，コントローラからリアルタイムで送られる電圧パターンをAVR(自動電圧調整器)系の指令値として取り込み，サイリスタ変換器から所定の電圧を出力する。電流パターンは，ACR(自動電流調整器)系の指令値として取り込み，電流帰還値との偏差に基づいて制御演算を行い，AVR系に加算される。

繰返し制御機能の概要について以下に述べる。繰返し制御の目的は，電磁石電源を運転しながら，所定の電流パターンを実現するために必要な電圧パターンを自動的に生成することにある[2)]。

(1)　シンクロトロンの運転に必要な要求磁場パターンから決まる電流パターンと電圧パターンを算出し，0次の近似値として主電磁石の運転を行う。

(2)　電源からの電流偏差信号を，指令値出力に対応した電流偏差パターンとして保存する。運転を複数回実行した後，各回の電流偏差パターンの，相対的に同時刻のデータを平均してノイズ成分を低減する。

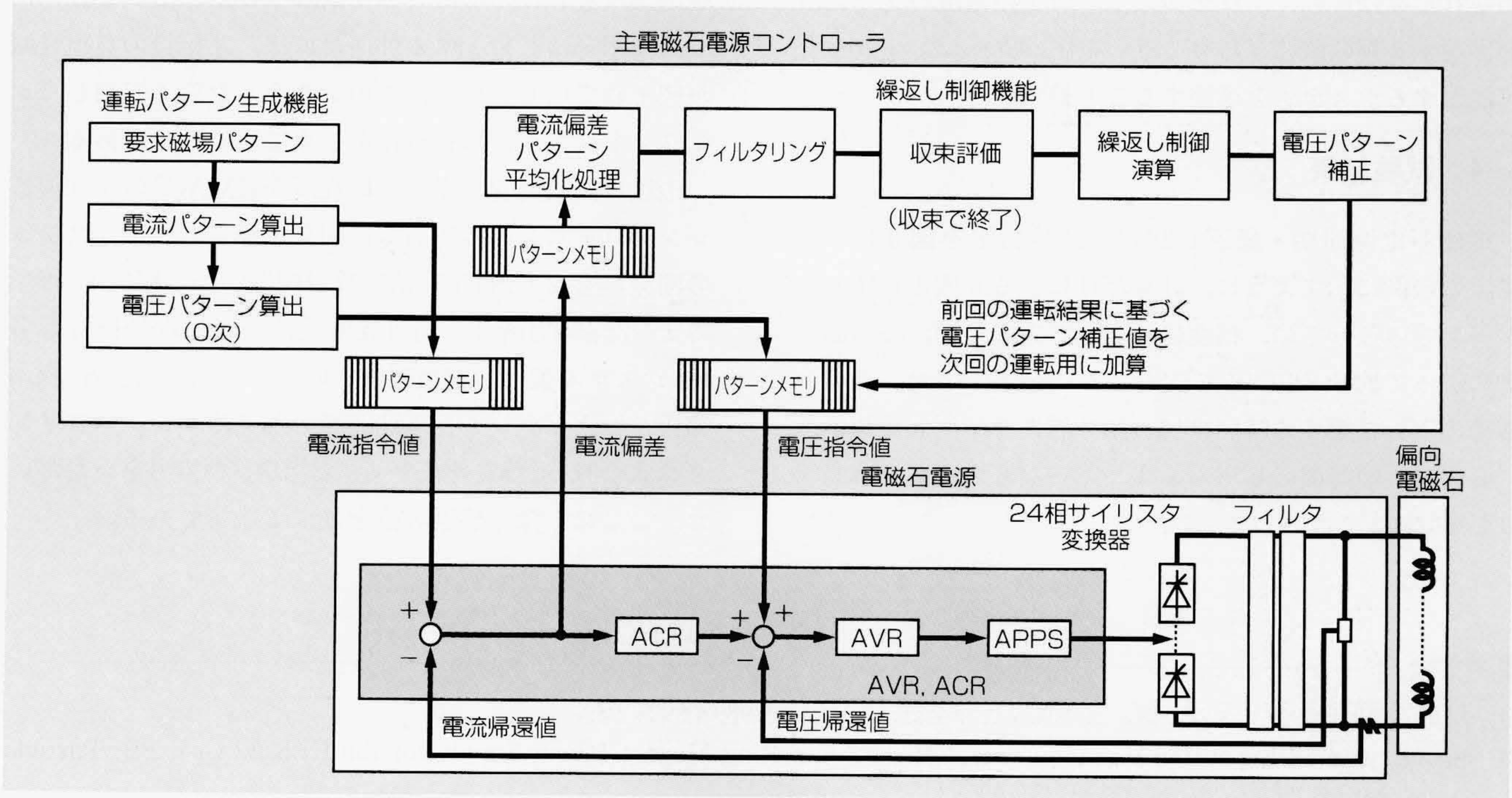


図 2　繰返し制御による電圧パターンの自動補正
いったん与えられたパターンによる運転結果に基づいて電圧パターンを補正し，電流偏差を収束させる。

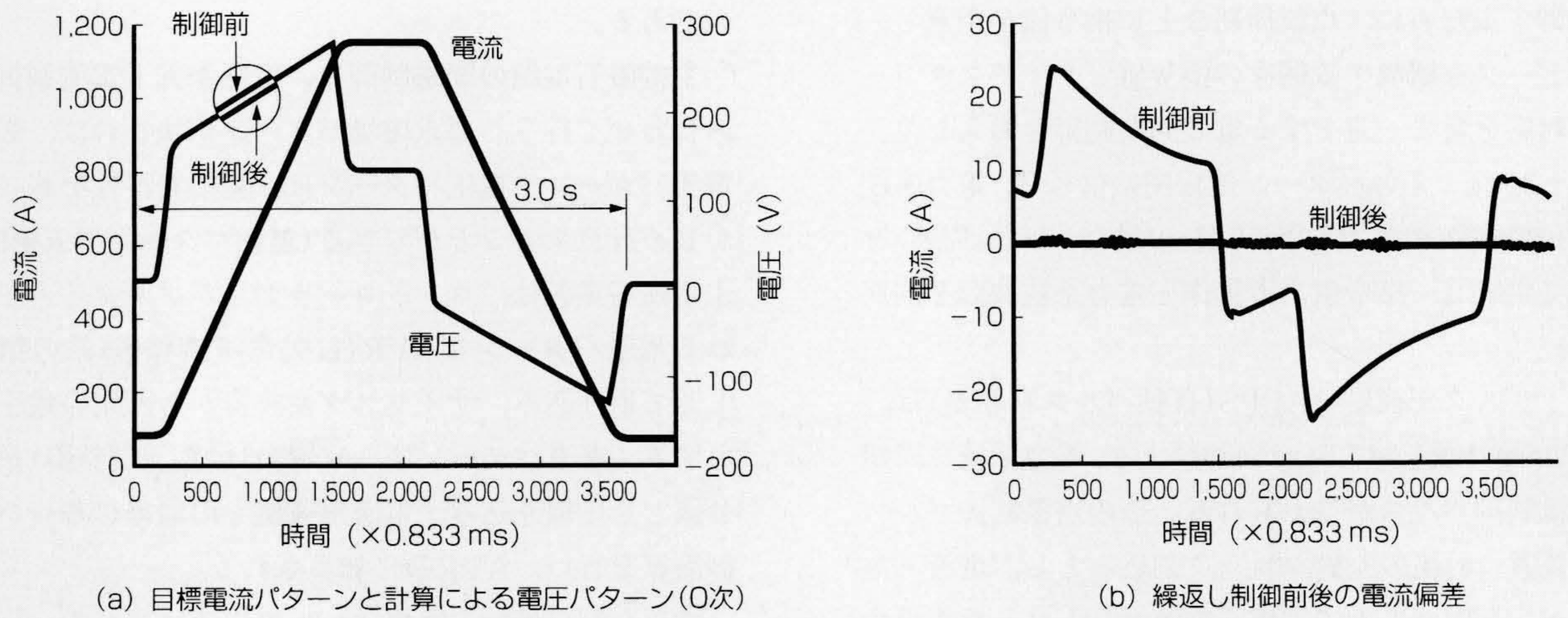


図3 電磁石電源同期・繰返し制御の効果
繰返し制御により，自動的に精度の良い電圧パターンを得ることができる。

(3) 平均化された電流偏差パターンを基に，電磁石の抵抗とインダクタンスを考慮して電圧パターン補正データを計算する繰返し制御処理を行い，その結果を前回の運転に使用した電圧パターンに加算し，1次の近似値としての新たな電圧パターンを得る。

以上のことを，電流偏差パターンの評価値が十分小さくなるまで繰り返すことにより，もし0次の電圧パターンが電磁石の飽和特性などの影響のために低い精度で算出された場合にも，これを補正し，所定の電流パターンを実現する真の値にきわめて近い電圧パターンの生成を可能とするシステムを構築することができた。

4. 試験結果

電磁石電源同期・繰返し制御の試験結果を**図3**に示す。この例に示すように，計算だけによる0次の電圧パターンでの運転では，精度は約2％であったが，この制御によって約8×10^{-4}まで改善することができた。この制御の実行に要する時間は10～20分であり，医療加速器に必要な，短時間のビームエネルギーなどの変更を容易にしている。

5. おわりに

ここでは，加速器用電磁石電源同期・繰返し制御システムについて述べた。

このシステムを適用した“HIMAC”では，運転周期・エネルギー・粒子種別など，数十種類の運転パターンを用意し，最初の2年間に約150人の治療を行った。その結果，6か月以内に腫瘍(しゅよう)の消失または大幅な縮小が認められたものだけで半数近くに上っている。

医療用をはじめとする加速器には，運転員の負担軽減が望まれている。今後，このシステムを広く適用し，シンクロトロン運転の省力化を進めていく考えである。

最後に，放射線医学総合研究所“HIMAC”の主加速器シンクロトロンの電磁石電源同期・繰返し制御システムの開発にあたり，科学技術庁放射線医学総合研究所 理学博士 平尾泰男所長，同研究所重粒子線物理学研究部各位，システム製作・調整関連での日立造船株式会社 松本節氏，およびデータ採取関連での加速器エンジニアリング株式会社 近藤貴律氏から，ご指導，ご協力をいただいた。ここに，深く感謝の意を表する次第である。

参考文献

1) 平尾：放医研の重イオン加速，日本原子力学会誌，31巻，pp.989～992(1989)
2) Sueno, et al.：Repetitive Voltage Control of the Main Ring Magnet Power Supply for the KEK 12 GeV PS, Particle Accelerators, Vol. 29, pp.133～138(1990)