

氏 名	小関 国夫
学位（専攻分野）	博士（工学）
学位記番号	総研大甲第 845 号
学位授与の日付	平成 17 年 3 月 24 日
学位授与の要件	高エネルギー加速器科学研究科 加速器科学専攻 学位規則第 6 条第 1 項該当
学位論文題目	Power Modulator for Induction Synchrotron
論文審査員	主 査 教授 平松 成範 教授 佐藤 康太郎 教授 中山 久義 教授 高山 健 助教授 安達 利一 助教授 和氣 正芳（高エネルギー 加速器研究機構） 教授 堀岡 一彦（東京工業大学）

## 論文内容の要旨

従来のシンクロトロンではビームの閉じ込め及び加速を、高周波電圧を加速空洞に発生させることにより行っている。このため、ビーム進行方向での位相空間を有効に活用できないという欠点があった。これに対して誘導加速シンクロトロンでは、正負両極性のパルス電圧によって進行方向でのビーム閉じ込めを行い、加速は別途空洞に発生させたパルス電圧によって行う。この閉じ込め及び加速という、シンクロトロンに要求される二つの機能を分離することによって、リング一周を覆う長大なビームの形成が可能となり、シンクロトロンにおけるビーム強度を従来のシンクロトロンと比較して約2倍、若しくはそれ以上に増強することが可能になると期待されている。

大強度シンクロトロンでは、ビームが加速空洞に誘導する逆加速電場によって、ビーム自身が影響を受けるというビームローディング効果が深刻な問題となる。この問題解決にはビームローディングによって発生した電場を補償する機構を設けるか、ビームから見た加速空洞システムのインピーダンスを低減するという方法がある。誘導加速シンクロトロンでは、パルス電源に半導体スイッチング素子を採用することで、将来における低インピーダンス加速システムの実現を目指した。

誘導加速シンクロトロンの原理実証試験が高エネルギー加速器研究機構の陽子シンクロトロンにおいて2003年から行われており、この目的のため本研究では、出力電圧2.3kV、最大繰り返し周波数1MHzという半導体パルス電源の開発を行い、当該実証試験に成功した。以下、所望性能を有する半導体パルス電源開発に当たって行った、回路解析及び測定結果に関して報告する。

高繰り返し運転に要求される立ち上がり時間の速いパルス電圧を出力する電源では、電源回路の持つ寄生容量及び寄生インダクタンスによって出力電圧に寄生振動が発生する。この加速電圧に含まれる振動電圧は、シンクロトロンを周回するビームに対して余分な収束及び発散力を与える。これによって、特にトランジション・エネルギーを持つシンクロトロンでは、深刻なビーム・エミッタンスの増大が引き起こされることが多粒子シミュレーションによって明らかになった。また、トランジション・エネルギーを持たないシンクロトロンにおいても、振動電圧によって形成されるポテンシャルにビーム粒子が捕捉されることによって、ビームの線電荷密度が変調され、電流密度が部分的に著しく増加し、空間電荷効果やマイクロウェーブ不安定性等の、各種不安定性により安定した加速が困難を来すことが推測された。加速パルス電圧の平坦度が10%以下であれば、トランジション通過時のエミッタンス増大を約1.5倍以下に、また振動電圧で変調されるビームのピーク電流も1.6倍以下に抑えられることも併せて明らかになった。これらシミュレーションの結果から、パルス電源の出力電圧平坦度としては、10%以下を目標に開発を行った。回路解析の結果、出力パルス電圧に現れる寄生振動は、電源回路の配線によるインダクタンスと半導体素子であるMOSFETがオフ時に持つ容量との結合により発生することが判明した。またこの問題を回避し、所望平坦度10%以下を達成するためには、電源内配線の改善による低インダクタンス化が有効であることが分かり、実機パルス電源において所望平坦度を達成した。

パルス電源において、半導体素子単体での定格電圧を超える出力電圧を得るためには、

複数の素子を直列に接続した構成とする必要がある。各素子を駆動する入力電力は各々接地電位から絶縁して供給する必要がある、このため各半導体素子の入力駆動電力は絶縁型 DC-DC コンバータによって供給されるものとした。絶縁型コンバータでの絶縁はトランスフォーマによって行われるが、この一次二次間には絶縁容量が存在する。しかし、絶縁容量がパルス電源の安定動作に対してどのような影響を与えるかについては、これまで定性的な検討に留まっていた。そこで本研究では絶縁容量の影響について、詳細な回路解析及び測定を行うことにより、絶縁容量がパルス電源の動作に対して与える影響を定式化し定量的に理解することに成功した。これら問題の特徴は、1) 絶縁容量と配線インダクタンスとの結合による出力電圧平坦度の悪化及び、2) 多段構成された各 MOSFET に印加される電圧に不均一を生じさせ、最悪の場合には素子破壊をもたらすというものである。また、これらの現象は絶縁容量 3.2 pF と極小にした絶縁コンバータを新規開発することによっても確認された。特に2) に関しては、1) 絶縁容量を低減すること、2) 絶縁容量と直列にチョークコイルを挿入すること及び、3) 半導体素子に並列にコンデンサを追加することが問題解決に効果的であることが確認され、この結果を基に実証試験で使用する実機パルス電源の製作を行った。

一連の研究開発の過程で製作された実機パルス電源によって、高エネルギー加速器研究機構 12 GeV 陽子シンクロトロンにおいて、誘導加速シンクロトロンの実証試験に成功した。実証試験においては、500 MeV で前段加速器から入射された陽子ビームを高周波加速空洞に発生させた閉じ込め電圧によって捕捉し、8 GeV にまで誘導加速電圧のみによって加速することに成功した。

## 論文の審査結果の要旨

小関国夫氏の博士論文は、シンクロトロンリング一周に近い長さを持つ長大なビームバンチ（スーパーバンチ）を誘導加速で加速することで、将来の大強度ハドロン加速器を実現すると云う、スーパーバンチ加速の実現を目指した実証実験に必要な、誘導加速空洞を駆動するための、高繰り返し連続運転モードの半導体大電力パルス電源の開発に関する研究である。本研究では、ビームトラッキングシミュレーションを駆使して、当該実証実験の第1段階である、高エネルギー加速器研究機構の12 GeV陽子シンクロトロンにおける誘導加速実験で必要とされるパルス電源に対する設計指針を導き、それに基づいて実証実験に用いるパルス電源を開発することで、世界で初めてシンクロトロンにおける誘導加速に成功した。

小関氏は、縦方向ビームトラッキングシミュレーションによって、誘導加速用パルス電圧のパルスエッジで発生するリング成分が縦方向ビーム分布に及ぼす影響、及びフェーズトランジション通過における縦方向エミッタンスの増加に対する影響を評価し、パルス電圧の平坦度として概略10%以下が必要であると云う設計指針を導きだしている。更にビームローディングによる実効的加速電圧の減少効果を解析し、将来の大強度スーパーバンチ加速のためには、電源を含めた誘導加速空洞系のインピーダンスは10オーム程度以下が望ましいことを示すことで、半導体スイッチ方式パルス電源開発の必要性に対する根拠の一つとしている。以上の解析に基づいて、最新の半導体素子である大電力高速スイッチング用MOSFETの多段構成による、デューティ50%以上、最高繰り返し1MHzで連続運転可能な、概略20ナノ秒のパルス立ち上がり時間を有するバイポーラー高速パルス電源を開発した。開発において、パルスエッジ部におけるスパイク電流によるMOSFETのジャンクション温度上昇の抑制と、配線インダクタンス等による寄生共振を抑制して出力パルスの平坦度を改善するために、ゲート抵抗による出力パルスの立ち上がり及び立ち下がり時間を最適値に制御することが重要であることを、詳細な回路解析及び実験に基づいて定量的に評価した。これは今後のパルス電源に対する設計指針を与えるものである。さらに、多段直列構成における各MOSFETへの電圧配分を一律に近づけ、また過渡的なスパイク電流によるゲート駆動回路の誤動作及び破壊を防止するために、ゲート駆動回路の対グランド容量の極小化が極めて重要であることをつきとめ、当該回路の電力源に15 pFの低絶縁容量DC-DCコンバータを採用することでこの問題を解決した。更に同氏は、絶縁容量3.2pFと云う極低絶縁容量のDC-DCコンバータを開発することで、多段スイッチング素子への電圧配分が計算で予想されるように、より一律化されることを示し、更なる高電圧の半導体パルス電源開発に対する設計指針を与えた。

以上のように、これまで半導体方式では困難であった高速、高繰り返し、CWモード大電力パルス電源を詳細な回路解析と実験に基づいて実現し、2.5 kVにて駆動される概略120オームの誘導加速空洞3台から成る加速システムによって、シンクロトロンにおける誘導加速に世界で初めて成功したことは高く評価できる。更に、今後のパルス電源開発に多くの指針を与えたことは高く評価され、審査員全員一致により小関国夫氏の論文は高エネルギー加速器科学研究科、加速器科学専攻の博士論文に値するものと判定する。