

SIサイリスタを用いたキッカー電源の開発と素子の放射線耐量

佐藤 皓^{A)}、中村 英滋^{A)}、村杉 茂^{A)}

波多野達彦^{B)}、丹下 正次^{B)}

徳地 明^{C)}

^{A)}高エネルギー加速器研究機構 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

^{B)}日本ガイシ株式会社 〒305-0801 名古屋市瑞穂区須田町 2 番 56 号

^{C)}ニチコン株式会社 〒525-0053 滋賀県草津市矢倉 2 丁目 3 番 1 号

概要

静電誘導型半導体素子は 1970 年代に西沢潤一氏[1,2]を筆頭に開発が進められ、今日、静電誘導型サイリスタ(SIサイリスタ)という高電圧・大電流素子の形で注目されている。特徴は、

- (1) 大電流高速応答
- (2) 一素子当たりの電流容量の大きさ
- (3) 導通状態時の電圧降下が小さく、ロスも比較的小さい
- (4) turn-ON, turn-OFF 可能で、低電圧ゲート回路の開発により高速性能の期待も大きい

等が挙げられる。特に、正弦波出力では $283 \text{ kA}/\mu\text{sec}$ という高速性能(矩形成型時は遅くなるが)を出した実績もあり、この点が魅力である。ここでは、加速器におけるアプリケーションの一つとしてキッカー電磁石の励磁電源スイッチング装置をターゲットに開発を進めてきた「3」。矩形パルスでの高速性能は負荷インピーダンスに依存する。 $Z_0 = 5 \sim 50 \Omega$ の範囲で通電試験を継続して行ってきた結果、好感触を得ており、実機相当の設計段階に入りつつある。

アプリケーションターゲットとして、統合計画大強度陽子加速器(J-PARC) 50GeV 出射キッカー(最大 $10\text{kA}/50\text{kV}:8\text{kA}/40\text{kV}@\text{OPE.}$, パルス長 $6 \mu\text{s}$, 2.8sec 周期連続モード)を目標にしている。当面は、40 kV 前後の実機を目安に、大電流・高速化を目標に開発を進めている。

同時にスイッチ部を負荷電磁石の近くに置くことができるかどうか、素子の放射線耐量測定を行った。

1 高速大電流矩形パルス源の開発状況

開発機として $20 \text{ kV}/2 \text{ kA}$ 出力で高速性能に重点を置いたスタックを製作した。SIサイリスタ素子はRS1600PA40T1(NGK)を採用した。素子と出力部の組配については同軸構造とした。図1にスタッキング構造断面図を、図2に構造外観を示す。負荷インピーダンス 5.6Ω で通電試験を行った。10D2W の同軸ケーブル9本を並列接続し、 5.6 オーム 負荷とし 5.3 オーム のダミー抵抗を通して終端した。図3にPFL(Pulse Forming Line)ケーブルとの接続及び負荷概略を示す。

図4に高耐圧コンデンサー(40kV仕様)を付加して、立上り改善を行い、波形整形を行った結果を示す。立ち上がり、平坦部ともに十分実用に耐える結果である。引き続き40kV以上を目標とした開発を行う予定である。

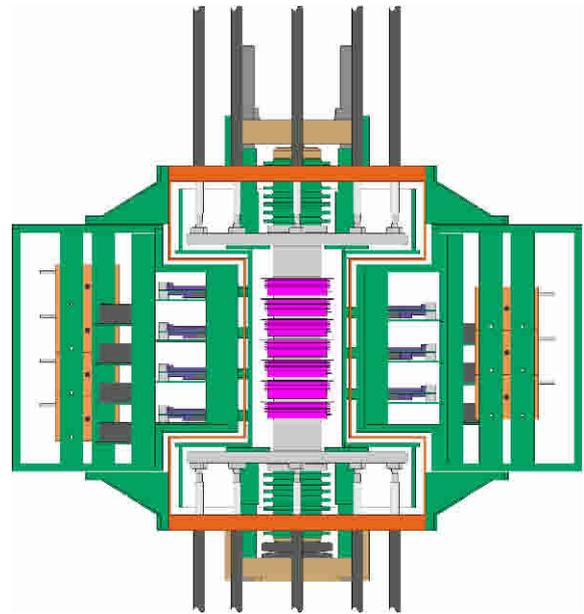


図1：スタッキング構造断面図



図2：SIキッカー構造外観

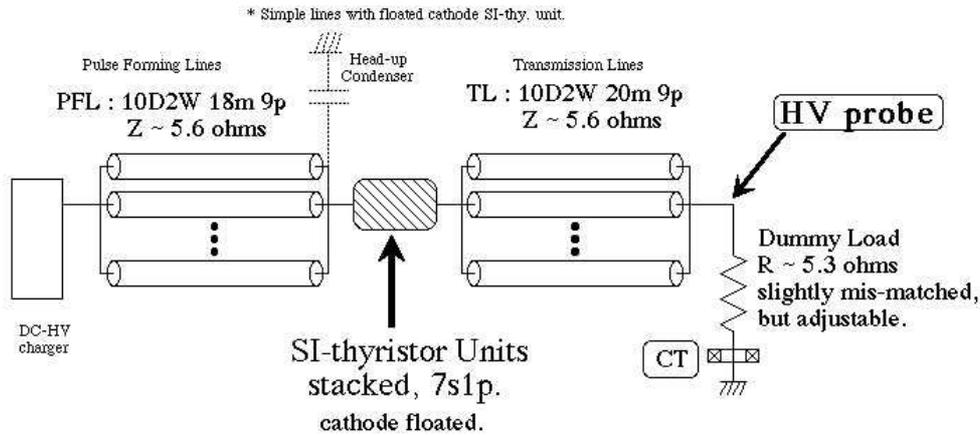


図 3 : 20kV/2kA 矩形パルス SI キッカー試験器と負荷接続概略

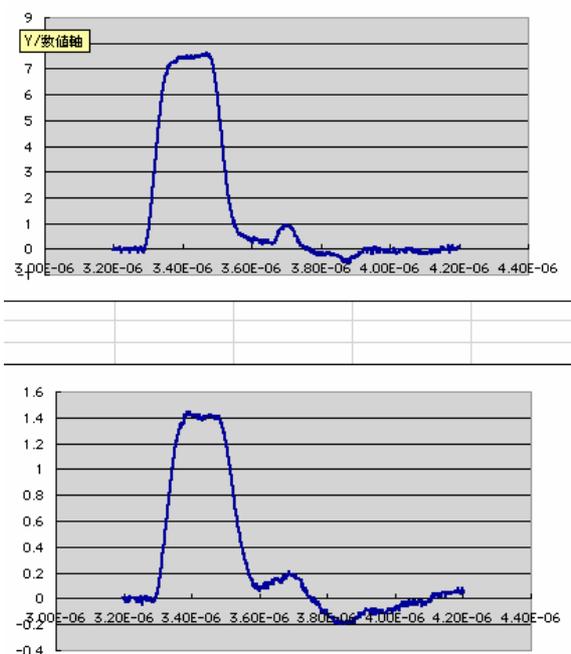


図 4 : 試験器における電流波形 (上:ヘッドアップコンデンサ無し、下:ヘッドアップコンデンサ 350pF 装着)

2 耐放射線性能試験

パルス電源の場合、可能な限り負荷電磁石の近傍にスイッチ部を設置することが特性上望ましいが、ハドロン加速器の場合は放射線の影響、特に電圧がかかっている状況下における放射線の影響を考えなければならない。

試験は 2 回に渡って行った。1 回目は素子の漏れ電流を観測して行ったが測定精度に問題があった。加速器が停止している状態では安定した信号を出していたが、運転が開始されると大きく変動し、当初は劣化が起きればこの変動幅以上の信号が観測できると考えたが結果的には劣化現象を把握できなかった。

2 回目は印加電圧を観測することとした。SI サイリスタは RT103N (NGK) を用いた。

2.1 試験概要

- ・ 期間 : 2003.1.9~5.13 (ビームユーザーは K2K)
- ・ 試験場所 : PS 加速器内 M1 サービス通路
- ・ 試験素子 : SI サイリスタ (RT103N) 3 個
- ・ 印加電圧 : DC3200V
- ・ 劣化度合モニター : 電圧
- ・ 照射放射線量 : 推定 260Gy。

測定開始後、電圧が落ちて素子 1 個が破壊した 4 月 21 日までを試験 1 とし、電源をリセットし、生き残っていた素子 2 個を使って測定を継続した 5 月 13 日までを試験 2 として、結果を表 1 に示す。

いずれの試験も加速器停止中の素子漏れ電流は安定していたが、運転開始直後に素子破壊が起こった。試験 1 において全素子が破壊しなかったのは、1 素子の破壊により電源の保護ヒューズが切れて電源が停止したためとみられる。

2.2 分解調査

① 素子内部の耐圧

素子分解後、内部のサイリスタ、ダイオード、分離帯の耐圧を測定した。結果は、表 2 に示すようにサイリスタ部の耐圧劣化が最も著しく、それによりダイオード部、分離帯の耐圧も低下していることが確認された。つまり、致命的な破壊箇所はサイリスタ部とみられる。また、# 602124 について、カソード島の耐圧をチェックしたところ、破壊部以外のゲート耐圧は正常値であったことから、破壊はかなり局部的に起こっていることが分かった。

表 1

	時期	結果
試験 1	2003.1 ~ 4	SI サイリスタ : 3 個中 1 個が劣化
試験 2	2003.4 ~ 5	SI サイリスタ : 2 個中 2 個が劣化 (試験 2 の残り素子で継続)

表 2

	素子番号	サイリスタ	ダイオード	分離帯 1
1	602115	2/5	75/5	70/5
2	602147	1/5	74/5	70/5

単位 [V/mA]

② 破壊様相－1（顕微鏡観察）

分解した素子の破壊様相を顕微鏡にて観察したところ、表 3 に示すように全ての素子でカソード面に局部的に炭化した破壊痕が見られた。主耐圧が劣化していることから、これらは主接合部（J2 接合：埋め込み p 層側）の破壊がカソード面に及んだものと推定される。

表 3

	素子番号	破壊状況
1	602115	カソード面：40D15 付近が炭化 アノード面：目立った破壊痕なし
2	602147	カソード面：50B8 付近が炭化 アノード面：目立った破壊痕なし

図 5 に試験 2 において破壊した素子の写真を示す。ピンポイントに破壊痕が生じていることが分かる。劣化素子の外観には破壊箇所が見られない素子もあることから、劣化は初め素子内部の接合部（空乏層）で局部的に起こり、その箇所に電流が集中して溶解破壊するとみられる。

3 まとめ

キッカー電源に用いられているサイラトロンスイッチにかわる長寿命素子として、S I サイリスタに着目し、開発を進めている。矩形パルス源として、特性インピーダンス 5.6Ω (1.8kA 出力) に対して、約 120 nsec の立上り時間を得た。PFL キッカーについても集中定数型キッカーについても使用可能であることが示された。今後は、陽子加速器等における high duty キッカーへの応用を目指す。

素子は加速器内の放射線暴露環境下では 2 次粒子等の放射線が素子に入射することにより破壊することが分かった。放射線暴露による耐圧劣化は、前兆として漏れ電流が徐々に増加する現象ではなく、短時間内に発生する。SI サイリスタ素子を分解して調べたところ、最も電界強度の強い pn 接合部付近で局部的に溶解破壊している。

放射化による劣化というよりは、放射線が接合部に入射し発生したイオンが高圧印加の下で急速にプラズマ柱（電子と正孔の高密度集合体）が生成され素子破壊に至ると思われる。

実用機においては可能な限り被曝を避けるようにし、電流の瞬時増加あるいは電圧の瞬時降下等を監視し放射線入射による異常検出を行って電圧を切るなどのインターロックが必要と思われる。なお、素子そのものの長時間運転としては KEK-B の低エネルギーリングにおける使用実績がある[4]。S I 素子は加速器リング内に設置されているが電子加速器では 2 次粒子による放射線損傷も無く実用できることを示している。

- [1] J. Nishizawa, "Static Induction Devices", Japanese patent. No. 1793126, 1977
- [2] J. Nishizawa et al., "Field-Effect Transistor Versus Analog Transistor", IEEE Trans. On Electron Devices ED-22(1975)185-197
- [3] H. Sato et al., "Pulsed Power Supply for the Kicker Magnet with SI-Thyristors", PRIA2002, KEK Proceedings 2002-30, p.106
- [4] T.Mimashi et al, "KEKB Injection kicker magnet system", Proceedings of the EPAC'2000, Vienna, Austria, June 2000

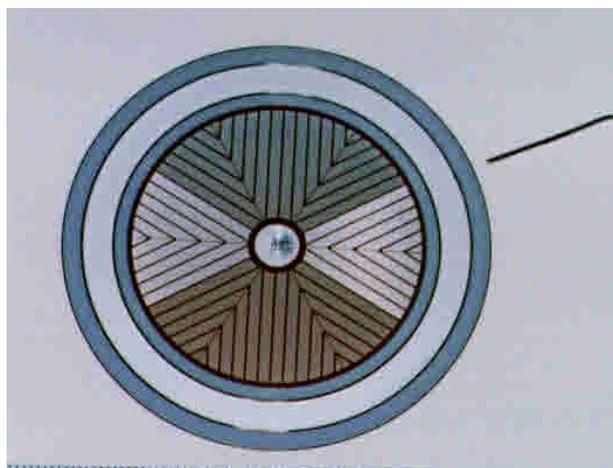


図 5：上の写真のピンで示した先の結合部に見られる溶解破壊痕。下はその拡大写真。