雷鳴-I 装置でのパルスパワー 技術に関する経験と新しい試み

米津宏昭, 田島輝彦, 水井順一, 佐藤守彦

(名古屋大学プラズマ研究所)

(1985年2月7日受理)

Pulse Power Technologies and Related New Approaches in LIMAY-I

Hiroaki YONEZU, Teruhiko Tazima, Jun-ichi Mizui
and Morihiko SATO

(Received February 7, 1984)

Abstract

Technological troubles and new approaches in a pulse-power machine : LIMAY-I as a relativistic electron and light ion beam generator are reported. Liquid Fron-113 is successfully tested as insulator of the Marx generator for the first case. We develop a new type of a SF_6 spark gap switch for the Marx generator.

§1. はじめに

パルスパワー装置雷鳴-I (LIMAY-I)での新しい技術的試みや約2年半の運転で生じたトラブルとその対策の幾つかを報告して今後の参考に供したいと思う。

マルクスゼネレーターに蓄えられたエネルギー(単機で最大1MJ)を高電圧(最大約10MV)かつ短時間(約30~100ns)で伝送するパルスパワー装置は, 相対論的電子ビーム(REB)発生や軽イオンビーム(LIB)の発生, あるいは(CO₂やKrF)レーザーの励起等に応用されている。J.C. Martin (英国アルダマスター研究所)のアイデア¹⁾が特に米国で発展し, 10年以上の歴史を持つが近年その性能値上昇は目覚ましい。我が国でもここ数年大学やメーカーで製作されているが単機1MJもの大型装置の開発経験はない。

プラズマ研究所で設計された Phoebus-II 装置²⁾³⁾(出力電圧800kV, パルス幅約100ns, 出力エネルギー数kJ)はSPAC装置へのREB入射装置として順調に稼働してきた。またLIBの基礎実験も定格の数分の1の運転条件に制限されたが, 共同研究として昭和50年度より行なわれた。そこでLIB発生モード(内部導体-正電位)でも定格運転が可能となるように, 57年3月にこのPhoebus-II装置が改造され雷鳴-I装置となった。主な改造点は次のとおりである(図1, 表1参照)。

Phoebus - II

LIMAY - I

図1. Phoebus-II 装置および雷鳴-I 装置概略図

(1) マルクスゼネレーター (MAXWELL 社製)

は流用するが、従来の油絶縁から液体フロン-113 絶縁を試み、消防法規制外装置として通常の建屋内実験室でも運転可能となるようにした。

(2) REB発生モード (内部導体-負電位) に対し、LIB発生モードの場合絶縁破壊の条件が

厳しくなるため、導体径が Phoebus - II の約2 倍のパルス成形ライン (PFL) を新設した。

(3) パルス成形ラインから伝送ライン (TL) へ電圧が伝送される際にそのピーク値は2 分の1 になるので、Phoebus - II のパルス成形ラインは伝送ラインに、出力ライン (OL) はそのまま出力ラインに流用した。

(4) 波形成形に重要な主ギャップスイッチを、単極 SF_6 ガスギャップスイッチから低インダクタンスの6 極水ギャップスイッチに変更した。(5) パルス成型ラインから伝送ラインに伝送する際に電圧が出力側に洩れるのを防ぐため、4 極 SF_6 ガス

表1. 雷鳴-I 装置性能仕様値

最大マルクスゼネレーター蓄積エネルギー	13.1 (kJ)
最大マルクスゼネレーター発生電圧	1.6 (MV)
パルスライン特性インピーダンス	3 (Ω)
最大出力エネルギー	6 (kJ)
最大出力電圧	600 (kV)
出力パルス半値幅	70 (ns)

プレパルススイッチを新設した。

§ 2. 液体フロンー 113 によるマルクスゼネレーターの絶縁

マルクスゼネレーターの絶縁には鉱油などの絶縁油か、高圧 SF_6 ガスが使用されている。今回の改造において、従来その例を見ないがこの絶縁に液体フロンー 113 の使用を試みた。液体フロンー 113 の絶縁耐圧は一般の絶縁油と同程度（約 1.2 MV/cm ）であるが⁴⁾、一方電気抵抗は 3 桁小さい。しかしマルクスコンデンサ充電時や、充電完了後のリークはほとんど問題にならない。表 2 にフロンー 113 の物理特性を、図 2 に温度と飽和蒸気圧の関係を示す。液体フロンー 113 による絶縁方式の長所は以下のである。

- (1) 不燃、非爆性で安全である（絶縁油は有燃性であり火災の危険がある）。
 - (2) 室温において気化しやすく油分などの洗浄作用もあり、装置のメンテナンス作業が清潔かつ容易である。
- 一方短所としては、
- (1) 価格が絶縁油より高価である（約 600 円 / リットル）。
 - (2) 沸点が約 48°C と比較的低温であるため、保存容器の温度および圧力の安全管理を要する。
 - (3) 絶縁油に比べて合成樹脂類を侵食しやすい。
 - (4) 絶縁油に比べてはるかに表面張力が小さいため、保存容器および

表 2. フロン 113 の物理特性

分子式	$\text{CCl}_2\text{F}_2 - \text{CCl}_2\text{F}_2$
分子量	187.4
沸点	$47.6 (^\circ\text{C})$
融点	$-35.0 (^\circ\text{C})$
密度 (20°C)	$1.578 (\text{g/cm}^3)$
表面張力 (25°C)	$19 (\text{dynes/cm})$
体積抵抗 (25°C)	約 $1 \times 10^4 (\text{M}\Omega/\text{cm})$ ※

〔注〕各値は“ASAHI FRON TECHNICAL REPORT 1”（旭硝子株式会社）より。ただし ※ に関しては、“フロンの電気的性質について”（日東化学資料）より。

図 2. フロン 113 の温度と飽和蒸気圧曲線

図3. 液体フロン 113 による耐食試験

液体フロン中の圧力容器などの密閉度が高く要求される。

しかし短所(1)に関しては長所(1)の理由から、消防法が適用されないだけ高額な防火設備を必要としないので一概には言えない。短所(2)に関しては保存容器を屋内に設置するならば、室温を適切に維持管理できるかぎり保存容器に簡単な安全弁を設ければ充分である。なお短所(3)に関してフロンメーカーに耐食試験(液体フロン-113に液温30~32℃で90日間浸漬)を依頼した。その結果を図3に示す。ここで、図中のacはアクリル樹脂、nyはナイロン樹脂、epはエポキシ樹脂、poはポリエチレン樹脂、pはPFAチューブ、phはフェノール樹脂である。また他の資料によれば、重量変化率、寸法変化率、溶出率はそれぞれ、シリコンゴムが174%、36.6%、4.7%、ウレタンゴムが10.4%、2.4%、1.1%、天然ゴムが29.5%、4.9%、13.2%、ニトリルゴムが13.4%、1.8%、17.7%(液温48℃で3日間浸漬)などである。また、テフロン、ABS樹脂、デルリンなどは耐食性が高いが、軟質塩化ビニールは逆に低いと言われている。雷鳴-I装置のマルクスゼネレーターにおいては、結線類の被覆にシリコンゴムが使用してあったので、これをポリエチレン被覆電線と交換した。現在すでに浸漬期間が2年以上になるが今のところ支持材、コンデンサ、スパークギャップスイッチなどの絶縁樹脂に対して異常は発生していない。ただ充電およびトリガー抵抗の絶縁樹脂が最近になり異常に軟化し一部には内部の抵抗体が破断するトラブルが多発したため、エポキシ系樹脂で表面コーティングした国産のセラミック抵抗と交換する予定である。

§3. マルクスゼネレーター起動スパークギャップスイッチのトラブルと改良試作 スパークギャップスイッチの通電試験

マルクスゼネレーターの主な消耗部品はスパークギャップスイッチである。雷鳴-I装置のスパークギャップスイッチ(MAXWELL社製)はPhoebus-II時代に約3万ショットもの通電履歴があり寿命からくる

以下のようなトラブルが発生した。

- (1) 封入ガス導入コネクタのねじ込み部分
(図4中、a)のシール(エポキシ系接着剤)
の不良による封入ガス洩れが全体(21個)
の約3分の1に発生した。
- (2) トリガー導入部分絶縁樹脂(図4中、b)
のひび割れがほとんどのスパークギャップス
イッチに発生した。
- (3) トリガー電極と主電極の絶縁部分(図4中、
c)の沿面破壊(常時導通状態)が3件発生
した。

これらの原因はスパークギャップスイッチの構造に問題があると思われるため、このスパークギャップスイッチと互換性を持った改良型の試作、通電試験を行なった。図5はこの試作スパークギャップスイッチの概略である。なお、主電極はMAXWELL社の部品をそのまま流用し、絶縁容器はポリカーボネイト、トリガー電極はSUS-304を使用した。試作スパークギャップスイッチの改良点は以下のである。

- (1) 構造を単純化し、ガスとトリガー導入部を
独立させ、導入部の絶縁本体の厚みを増し強
度を高めている。
- (2) 2分割構造により内部のメンテナンスを容
易にしている。
- (3) 内部沿面に波形を設けて絶縁強度を高めて
いる。
- (4) 現行型は封入ガスに酸素(20%)窒素(80
%)の合成エアールを使用している。この場合の
封入ガス圧は最高 7 kg/cm^2 にもなり、この
ことがスイッチ各部の破壊の一因となってい
た。改良型は SF_6 ガスを使用することとし、

図4. MAXWELL 社製スパークギャップ
スイッチ概略図

図5. 試作スパークギャップスイッチ概略図

封入ガス圧を最高 2 kg/cm^2 程度と比較的低圧に抑えた。

また通電試験は、ギャップ長を変えて（トリガー電極の厚みを変える）、以下の初期・ガス圧－電圧特性試験（100ショット）、大電流通電試験（絶縁容器内沿面耐圧、絶縁容器対衝撃圧力特性、自爆電圧の安定性、1000ショット）、大電流通電後・ガス圧－電圧特性試験を行なった。なお通電時の通過クーロン量は0.9クーロン/ショットである。この大電流通電試験（1000ショット）は雷鳴－I装置における5～6万ショットに相当するもので、今回特に大きな問題点はなく充分耐久性、実用性があると思われる。図6に通電試験によるガス圧－電圧特性（動作特性）を示す。

§4. 雷鳴－I装置の主ギャップスイッチ

前述したようにパルス成形用の主ギャップスイッチとして、P hoebus－IIでは単極 SF_6 ガスギャップスイッチが使用されてきた。

図6. 試作スパークギャップスイッチ通電試験によるガス圧－電圧特性（動作特性）曲線

図7. 雷鳴－I装置の主ギャップスイッチ概略図

雷鳴-I 装置では図7に示すような6極水ギャップスイッチを採用した。これは成形パルス幅が50 nsもの短パルス为目标(実測では70 ns)とし, より低インダクタンス化を目的とするためである。なお, 電極材質は当初SUS-304を使用していたが放電による電極面の消耗が激しいため, 現在ではAg-W(銀タングステン)を使用している。ギャップスイッチの動作時のインダクタンスは一般に次式で算出できる⁵⁾。

$$L = \mu_0 b / 2\pi \cdot \left\{ 1/N \cdot \ln(R/N \cdot a) + (N-1)/N \cdot \ln(R/r) \right\} \quad [H]$$

ここで, N: 電極数, a: 電極直径(m),

R: パルス成形ラインの外部導体半径(m),

r: 電極配置半径(m), b: 内部導体間距離(m)である。式中中括弧内, 第1項は電極の本数効果, 第2項は接近効果を意味する。図

8にこの式より算出される雷鳴-I 装置水ギャップスイッチの動作電極数に対するインダクタンスの変化を示す。これより全電極動作時のインダクタンスは約40 nHとなる。しかし各部の等価的な回路定数を実測, 検討すると約75 nHになる(§5参照)。主な理由としては図8から推測できるように, 最初に主なパルス成形に寄与する1~2極が動作しその後残った電極が動作していると思われる。

したがって電極の構造や形状等(雷発生モードとLIB発生モードとでは電極の構造や形状等によって放電のメカニズムが異なる)の改良などを施して, 全ての電極がパルス成型に寄与するように極力同時に動作させることが今後の課題であろう。

主ギャップスイッチに水ギャップスイッチを使用する場合は, 通電時の衝撃波対策が重要となる。雷鳴-I 装置では衝撃波を逃がす開口部は設けず, 剛構造設計を採用した。幸いにも最も弱いアクリル樹脂製絶縁円板の破損はないが, 水ギャップスイッチの電極, 水ギャップ長調整機構部等の破損, 取り付けネジ部の緩み等があった。またこの衝撃波はマルクスゼネレーターにも次のようなトラブルを生じさせた。

- (1) マルクスゼネレーターの固定が不十分であったため, マルクスゼネレーター本体がフロン中に浮き上がり抵抗の破損, 結線の断線等を起した。
- (2) マルクストリガー回路の高圧パルス発生回路は, フロン中のマルクスゼネレーター本体内に設置してあったためスイッチ素子のクリトロンがコネクターから脱落した。

(2)に関しては, フロンタンク内に露出していた高圧パルス発生回路の基盤をアクリル樹脂性の箱に収めることにした。またフロン中の塵あいの付着による高電圧部(クリトロン端子間)の絶縁破壊等が発生したため,

図8. 雷鳴-I 装置の主ギャップスイッチの動作電極数に対するインダクタンス

クリトロンのコネクターを沿面耐圧の大きなもの（自作品）と交換した。

§5. 雷鳴-I装置の特性

雷鳴-I装置のパルスの発生、伝送、出力等の特性を明らかにするために、出力端にインピーダンスマッチングした 3Ω の液体（塩化アンモニウム水溶液）抵抗負荷を設置した。パルス成型ライン，伝送ライン，

図9. 雷鳴-I装置等価回路図

表3. 雷鳴-I装置等価回路定数

RM	MARX (動作時) 内部抵抗	5 (Ω)
LM	MARX (動作時) インダクタンス	3.4 (μ H)
CM	MARX (動作時) キャパシタンス	10 (nF)
ZP2	MARX-PFL 接続部特性インピーダンス	20 (Ω)
IP2	MARX-PFL 接続部長	0.3 (m)
RP	PFL 内部 - 外部導体間抵抗	360 (Ω)
ZP1	PFL 特性インピーダンス	3 (Ω)
IP1	PFL 導体長	0.84 (m)
LS2	主ギャップスイッチ (動作時) インダクタンス	75 (nH)
RS2	主ギャップスイッチ (動作時) 抵抗	0.6 (Ω)
CS21	PFL-TL 内部導体間キャパシタンス	700 (pF)
CS22	主ギャップスイッチ (動作時) キャパシタンス	44 (pF)
RT	TL 内部 - 外部導体間抵抗	390 (Ω)
ZT	TL 特性インピーダンス	3 (Ω)
IT	TL 導体長	1.1 (m)
LS3	ブレパルススイッチ (動作時) インダクタンス	20 (nH)
RS3	ブレパルススイッチ (動作時) 抵抗	10 (m Ω)
CS31	TL-OL 内部導体間キャパシタンス	50 (pF)
CS32	ブレパルススイッチ (動作時) キャパシタンス	2 (pF)
R0	OL 内部 - 外部導体間抵抗	440 (Ω)
Z0	OL 特性インピーダンス	3 (Ω)
IO	OL 導体長	1 (m)
LD	負荷インダクタンス	50 (nH)
RD	負荷抵抗	3 (Ω)
CD	負荷キャパシタンス	100 (pF)

[注] MARX : Marx Generator PFL : Pulse Forming Line
 TL : Transmission Line OL : Output Line
 導体間抵抗値は純水の抵抗値を $5 \times 10^5 \Omega/\text{cm}$ として算出。

出力ラインの電圧を容量分圧器により、負荷部電流をログスキーコイルにより測定した。これらの実測値を解析した等価回路を図9に示す。図9における各記号の説明及び定数値を表3に示す。また図10に各部の実測波形および等価回路によるシミュレーション波形を示す。これらの解析によりマルクスゼネレーターの定数値はMAXWELL社の設計値である $RM=1.5\ \Omega$ 、 $LM=8\ \mu H$ とは大幅に異なっていることがわかった。主ギャップスイッチ（動作時）インダクタンスの算出は§4に述べたとおりである。

表4に雷鳴-I装置の電圧伝送効率を示す。マルクスゼネレーターから負荷に至る全体の電圧伝送効率は62%であった。各部の計算値に対して実測値が低い原因として、計測時のMARX→PFLにおいてはマルクスゼネレーターの発生電圧の測定精度が低い、PFL→TLにおいては主ギャップスイッチ動作時のアーク抵抗の時間的評価があいまいな

となどが考えられる。またエネルギー伝送効率（Energy Delivery Efficiency）： η は、

計算値： $\eta = 0.47$

実測値： $\eta = 0.41$

（MARX→LOAD）

であった。

図11に主ギャップスイッチ動作タイミングと出力エネルギー効率の関係

図10. 雷鳴-I 装置各部の実測および等価回路によるシミュレーション波形

表4. 雷鳴-I 装置の電圧伝送効率

	実測値	計算値
MARX → PFL	78 %	89 %
PFL → TL	90 %	98 %
TL → OL	100 %	97 %
OL → LOAD	89 %	92 %
[MARX → LOAD]	[62 %]	[78 %]

図11. 主ギャップスイッチの動作タイミングと出力エネルギー効率

を示す。タイミング0nsec は PFL 充電電圧波形のピーク時である。この図より動作タイミングが±50 ns 程度のずれの動作であれば伝送効率上問題ないことがわかった。

謝 辞

雷鳴-1装置の開発および現在に至る保守管理に際して、種々御指導、御助言して下さった名大プラズマ研の毛利明博教授ならびに都築哲哉技官に心から感謝いたします。また、装置設計、製作にあたって技術協力していただいた日新電機株式会社、およびフロン-113による耐食試験を行なっていただいた旭硝子株式会社に深く謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) J. A. Nation ; "High-Power Electron and Ion Beam Generation" , Particle Accelerators, Vol. 10 (1979) 1.
- 2) 都築哲哉, 増崎 克, 毛利明博 ; 「核融合研究」(別冊) Vol 37, No. 1 (1977) 7.
- 3) 都築哲哉, 毛利明博, 成原一途, 久保田雄輔, 藤若節也, 増崎 克 ; 「核融合研究」(別冊) Vol. 41, No. 1 (1979) 1.
- 4) E. A. Beacham, R. T. Divers ; "Dielectric Properties of Refrigerants" , Ref. Eng. July (1955) 33.
- 5) J. Katzenstein ; "Optimum Coupling of Imploding Loads to Pulse Generators" , J. Appl. Phys, Vol. 52 (1981) 676.