

FEL 用 S バンドロングパルスクライストロンの動作安定化テスト

境 武志^{1,A)}、佐藤 勇^{B)}、早川 建^{B)}、田中 俊成^{B)}、早川 恭史^{B)}、横山 和枝^{B)}、菅野 浩一^{A)}、石渡 謙一郎^{A)}、中尾 圭佐^{A)}、橋本 英子^{A)}、藤岡 一雅^{A)}、村上 琢哉^{A)}、長谷川 崇^{A)}、宮崎 慎也^{A)}

^{A)} 日本大学大学院 理工学研究科 量子理工学専攻 電子線利用研究施設

〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1 日本大学理工学部船橋校舎物理実験 B 棟

^{B)} 日本大学 量子科学研究所 電子線利用研究施設

〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1 日本大学理工学部船橋校舎物理実験 B 棟

概要

日本大学量子科学研究所電子線利用研究施設(以下LEBRA)では、2000年度から行っているクライストロン RF 窓下流側の真空排気能力強化によって、短パルス用クライストロン PV-3030A1 (三菱電機製)をくり返し 12.5Hz、パルス幅 20 μ s で出力電力 20MW の厳しい運転条件で動作させることに成功した。しかし高出力、長パルス動作が可能になったが、出力電力パルス内での位相変動、位相変動による FEL 発振不安定性等の問題が起きている。ここではクライストロン入力空洞からの反射電力、クライストロン出力電力内位相変動、RF 窓周辺の放射線量等をモニターしながら、集束磁場の条件を変えて調整を行いクライストロンの動作安定化を行った。その結果調整前に比べクライストロン出力電力が安定した。

1. はじめに

LEBRA では赤外線から紫外線波長領域(0.3~5.0 μ m)の FEL 発振、エネルギー範囲 3~30keV のパラメトリック X 線放射の発生を目指しており、2001年5月に 1.5 μ m の FEL 発振に成功している^[1]。そして各線源の実用化のために発生装置には安定で良質な電子ビームの供給が必要であり、リニアックの安定化、及び高度化を現在行っている。リニアックの安定動作にとって RF 源安定化は特に重要である。

今回クライストロン 1 号機に使用していたアンプの交換を行った。アンプのクライストロンへの接続前の出力動作試験では出力位相には変動が目立たなかったが、クライストロンに接続したところ急に変動が起き始めた。そこでクライストロンから RF 入力部分への反射電力を測定したところ、反射電力とアンプ位相変動の間には何らかの関係があることがわかった。そこでクライストロン出力電力、出力電力パルス内位相変動をモニターし、さらに出力空洞から RF 窓周辺部の放射線量を測定しながらクライストロン集束磁場調整を行った。ここではクライストロンからの反射測定、集束系調整について報告する。

2. クライストロン集束磁場調整

今回パルス内の位相変動の小さい S バンドアンプ(前置アンプ)への交換を行ったが、アンプからクライ

ストロンに供給するラインを接続すると、アンプの出力位相と振幅がパルスごとに変動することがわかった。これはアンプ単体で行ったテスト試験の時には起きていなかったが、供給ラインを繋ぐと変動が生じた。この現象は交換前のアンプでも起きていたようだが、新しいアンプでは位相に特に注目していたので、詳しく原因を追求することにした。クライストロン入力空洞からの反射が何らかの影響を与えていると考え、空洞からの反射を測定することにし、クライストロン集束磁場調整を行うこととした。

2.1 使用中の S バンドククライストロン

LEBRA では KEK の RF 入射部で使用していた短パルス用クライストロン PV-3030A1 を移設し、真空排気強化を行い 2 台使用している^{[2][3]}。使用しているクライストロンを図 1 に、運転スペックを表 1 に示す。



表 1:LEBRA でのクライストロン PV-3030A1 運転スペック

動作周波数	2856MHz
出力電力	18~20 MW
パルス幅	20~21 μ s
パルスくり返し	2~12.5 Hz
ビーム電圧	210~249kV
ビーム電流	195~226A

図 1: クライストロン PV-3030A1(三菱電機製)。RF 窓下流で真空排気強化を行っている。

2.2 反射電力測定

クライストロンの電力入力端子の前に方向性結合器をつけ、クライストロンから反射してくる電力の測定を行った。反射電力は校正した検波器を用いて測定した。測定方法の概略図を図 2 に示す。

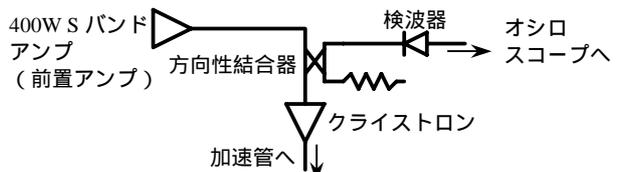


図 2: 反射測定での概略図。クライストロンからの反射は方向性結合器で取り出し、検波器を用いて測定した。

¹ E-mail: sakai@lebra.nihon-u.ac.jp

反射電力測定の結果、クライストロンを動かしていないときは入力電力約100Wに対して、およそ27Wも反射し、クライストロンを動かしている場合(ビーム電圧249kV時)でもおよそ7W反射していることがわかった。クライストロン停止時に反射電力が多いのはクライストロンとのマッチングが取れていないため、ビームを通し、ビーム電圧を上げていけばマッチングが取れ始め、反射が減少する。

2.3 反射とアンブ位相との相関関係

クライストロン入力空洞からの反射電力とアンブ位相との相関関係を見るために、2つの値を同時に測定し比較した。測定ではクライストロン集束コイルの電流値をいくつか変えて行った。測定した中で大まかに2つのパターン(パルスごとの反射電力の変動が大きい時と小さい時)があった。図3に反射電力とアンブ位相角の相関関係を示す。しかし、アンブにはサーキュレーターが入っているため反射の影響は通常考えにくい、反射電力とアンブの位相の間には何らかの相関関係があると思われる。

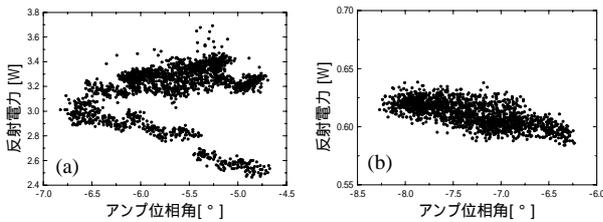
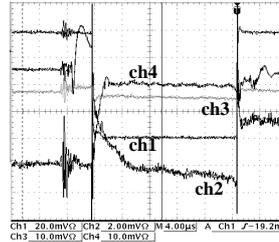


図3：反射電力とアンブ位相角の相関関係。(a)パルスごとの反射電力の変動が大きい時。いくつかの島に分かれている。(b)パルスごとの反射電力の変動が小さい時。

2.4 クライストロン集束磁場調整

2.2節で述べたように、クライストロンの反射の測定からクライストロン入力空洞からの反射電力が以外に多いことがわかり、現在のクライストロン集束磁場があまり最適化されていないと考えられた。また2.3節で示したように、反射電力とアンブ位相角の間に何らかの関係がある。そこで、反射電力とクライストロン出力電力、出力電力位相、アンブ出力位相を主にモニターし調整を行うことにした。また集束の状態によってはドリフト管にビームがあたり、そこからの放射線量の増加があると考えられるので、クライストロン出力空洞からRF窓周辺部の放射線量のモニターも行うことにし、合計5つの値をモニターしながらクライストロン集束磁場の調整を行うことにした。この調整では、クライストロン出力電力値のみを見るのではなく、位相変動に注意しながら、クライストロンから戻ってくる反射をできるだけ少なくなるようにし、なおかつ、放射線量もできるだけ低くなるように調整を行うことにした。放射線量の測定はアロカ製の線サーベメータを用い、RF窓部に取り付けられている鉛ブロックを外して行った。集束磁場調整前の出力電力、反射電力、クライストロン出力位相、アンブ位相を図4に示す。このときの放射線量は1.5 μ Sv/hであった。



ch1:クライストロン出力電力
ch2:アンブ出力の位相
ch3:クライストロンからの反射
ch4:クライストロン出力位相
(出力電力18MW、反射電力7W、放射線量1.5 μ Sv/h、パルスごとのアンブの位相変動2 $^\circ$ 、パルスごとのクライストロン位相変動0.8 $^\circ$)

図4:クライストロン1号機における出力電力、反射、アンブ位相、クライストロン出力電力位相。

2.5 調整結果

クライストロン集束磁場の調整はいくつかのパターンで行った。図5にクライストロン集束コイルと各空洞の位置関係を示す。同図内に過去に三菱電機で行った動作テスト時の磁場分布を示した。はじめに、図5で示した磁場分布のために集束コイルの電流値を設定し、その値を基準として集束磁場調整を行った。表2に各調整条件を示す。

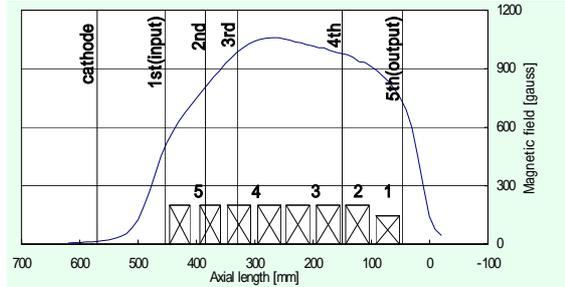


図5：各空洞と集束コイルの位置、及び磁場分布。

表2：各調整条件

- | |
|--------------------------------------|
| (a):三菱電機での動作テスト時の磁場分布(図5参照) |
| (b):設定(a)からコイル1の電流を30%下げ、コイル5を30%上げる |
| (c):設定(a)からコイル3~5の電流を10%上げる |
| (d):設定(a)からコイル3を25%、コイル5を10%上げる |

調整条件(a)では、図6-(a)のような結果になった。このとき出力電力18MW、反射電力0.8W、放射線量1.0~1.3 μ Sv/hであった。次に調整条件(b)では、図6-(b)のようになり、出力電力波形の形や出力値にはあまり変化が見られなかったが、後半部分の位相と反射波が部分的に欠ける現象が見られた。このときの出力電力19.8MW、反射電力0.9~2W、放射線量2.0 μ Sv/hであり、(a)より全体的に悪くなった。次に調整条件(c)の結果を図6-(c)に示す。このとき各波形の後半部分が乱れてしまった。このときの出力電力17MW、反射電力1.2W、放射線量は(a)、(b)の時より多く2.5~3.0 μ Sv/hであった。この磁場分布では、クライストロン内部で電子ビームがドリフト管等に当たっている可能性が高いと考えられる。図6-(d)には調整条件(d)の場合を示す。このとき、出力電力18MW、反射は十分に抑えられ約0.6Wであった。また放射線量も0.5~1.0 μ Sv/hと低く抑えることができ、位相の変動量も少なくなった。表3に各条件での反射電力、パルスごとの変動量(温度による長期変動は含んでいない)、放射線量をまとめた(条件(c)は変動計測を行っていないので未記入)。以上の調整より、調整前に比

べ出力電力は減少したが、電子ビーム加速ための必要電力値は満たしているため、調整(d)を採用した。

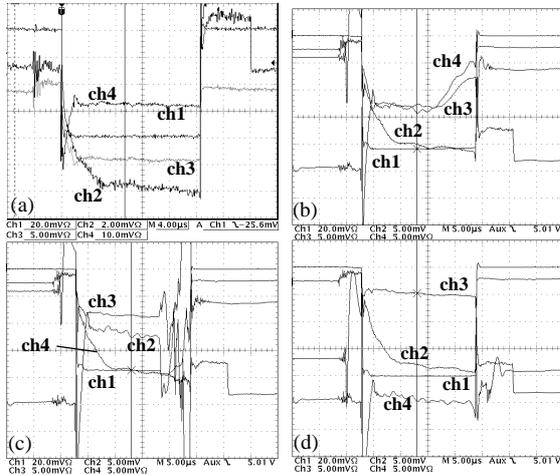


図 6 : クライストロン集束磁場調整による反射と位相の波形 (*各 ch は図 4 と同じ)。 (a)三菱電機での動作テストで用いた磁場分布の場合。この時を基準に調整。 (b)コイル 1 の電流を 30% 下げ、コイル 5 を 30% 上げた場合。 (c)コイル 3~5 の電流を 10% 上げた場合。 (d)コイル 3 の電流を 25%、コイル 5 を 10% 上げた場合。

表 3:各調整におけるパルスごとの安定度の比較

調整条件	kly 出力 変動[%]	kly 位相 変動[°]	Amp 位相 変動[°]	反射電力 [W]	放射線量 [μSv/h]
調整前	±1	0.8	0.2	7	1.5
(a)	±1	0.5	0.2	0.8	1.0~1.3
(b)	±2	0.3	0.15	0.9~2	2.0
(c)				1.2	2.5~3.0
(d)	±0.8	0.3	0.15	0.6	0.5~1.0

*温度変化による長期変動^[4]は含んでいない。

3 . 反射波の周波数成分測定

クライストロンから反射してくる波の中に高調波成分やサブハーモニックな周波数成分が含まれている可能性が懸念されたので、反射波の周波数成分測定を行うことにした。始めにスペクトラムアナライザを用いた測定を行ったが、2856MHz の周波数成分があることの確認が取れただけで、高調波、サブハーモニック成分は無かった。また同時にミキサーを用いた測定も行った。測定方法の概略図を図 7 に示す。測定では反射してくる波とシグナルジェネレータ(SG)の CW の信号をミキサーに入れ、周波数を変化させながら測定を行った。しかし、反射波に対して周波数の低い周波数帯域をカットできるフィルターが無かったので、ミキサーでの測定も 2856MHz の測定しか行えなかった。図 8 に SG 入力信号の周波数が 2856MHz の時と、1MHz ずれた時の信号を示す。

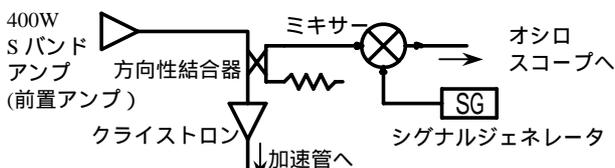


図 7 : 反射波の周波数測定の概要図。反射信号と SG からの信号をミキサーに入れ測定。

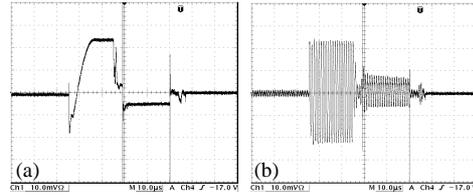


図 8 : 反射波の周波数測定結果。 (a)SG からの信号の周波数が 2856MHz のとき。反射波には 2856MHz の周波数成分が含まれていることがわかる。 (b)SG からの信号が 2856MHz から 1MHz ずれたとき。反射波と SG からの信号との周波数のずれが見えている。

4 . まとめ

クライストロン入力空洞からの反射電力、出力電力、出力電力パルス内の位相、アンプ位相、放射線量をモニターしながらクライストロン集束磁場の調整を行ったが、集束磁場の調整により反射を抑えながら位相変動もできるだけ小さい状態にし、なおかつ放射線量を下げないように調整を行うことで、変動をある程度まで抑えることができたといえる。クライストロンの長パルスでの安定動作のためには、単に出力電力のみに注目して集束調整を行うのではなく、クライストロン入力空洞からの反射電力、クライストロン出力電力位相、アンプ位相、放射線量等の複数のパラメーターをモニターしながら調整を行うことが必要といえる。

5 . 今後の課題

今回の集束磁場調整では、1号機のみ調整を行ったが、2号機でも同様の調整を行い、実際に加速する電子ビームの安定度、自由電子レーザー発振での安定度と比較した確認を行う予定である。

また、LEBRA でのロングパルス運転条件におけるクライストロンの最適な集束条件に関して、今回の調整条件と結果とを考慮しシミュレーションを行い、クライストロン内部での状態を調べ、出力電力のより高い安定化を行っていく。

3章で述べたスペクトラムアナライザ、ミキサーを用いた反射波周波数測定では高調波成分等が存在するかどうかの確認ができなかったため、バンドパスフィルターを用いて反射波の周波数成分に 2856MHz 以外の周波数成分が含まれていないかどうかの測定を行い確認する予定である。

参考文献

[1] Y.Hayakawa, et al., "First Lasing of LEBRA FEL in Nihon University at a wavelength of 1.5μm", Nucl. Instr. and Meth. A (2002), Volume483/1-2, pp.29-33 (NIMA18811)

[2] T.Sakai, et al., "Improvement of the Long Pulse Operation of the S-Band Klystron", Proceedings of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan, Himeji, July.12-14, 2000, p228-230. URL: http://www-linac.kek.jp/mirror/www.spring8.or.jp/JAPANESE/conference/li-me00/proc_index.html

[3] 境 武志, その他, "FEL 用クライストロンのグレードアップ", Proceedings of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, August.1-3, 2001, p222-224. URL: <http://conference.kek.jp/LAM26/>

[4] 横山 和枝, その他, "クライストロンドライブ系の位相安定化", Proceedings of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, August.1-3, 2001, p231-233. URL: <http://conference.kek.jp/LAM26/>