

自己回帰モデルによる電子ライナックの安定性の研究

猪坂 智^{1,A)}、小西敏文^{A)}、榎 泰直^{B)}、加藤龍好^{A)}、磯山悟朗^{A)}

^{A)} 大阪大学産業科学研究量子ビーム発生科学研究分野

〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 8-1

^{B)} 日本原子力研究所東海研究所

〒319-1106 茨城県那珂群東海村白方字白根 2-4

1. はじめに

我々は産研附属放射線実験所の L バンド電子ライナックを用い、遠赤外線領域での自由電子レーザー (Free Electron Laser : FEL) や自己増幅自発放射光 (Self-Amplified Spontaneous Emission : SASE) の開発研究を行っている。これらの研究には電子ビームが安定であることが求められる。しかしライナックを長時間運転するとき、ビームパラメータの変動が観測され、研究の妨げとなっている。この電子ビームの不安定性は電子の加速に用いる高周波 (RF) の電圧や位相変動が主な原因と考えられる。そこで、RF の変動に影響を及ぼすと思われる様々なパラメータ (電源電圧、加速器各部の温度、環境温度) の時間変動を測定した。測定結果を自己回帰モデルにより解析し、ノイズ寄与率を求めた。さらに RF 位相のフィードバックシステム構造を推定することで、位相変動の要因を特定することにした。

2. 自己回帰モデルを用いた周波数解析

自己回帰モデルとは、変数間に相関がある系を解析するのに有効な統計的モデルである。このモデルを用いたシステムの周波数的な解析手法は、赤池により確立されている^[1]。過去には、Spring-8 入射器の安定性の研究に応用された実績もある^[2]。

この解析手法を用いることで“ある周波数分布密度にその変数と独立した複数の変数から受ける影響の割合”を求めることができる。これを“ノイズ寄与率”と呼ぶ。さらに、このノイズ寄与率を周波数に対してグラフ化すると、変動に大きな影響を与えるパラメータほど大きな面積で示されるため、直感的な判断をしやすく、システムの影響を定量的に理解できる。という重要な利点がある。

3. 測定体系

本研究の測定体系および阪大産研 L バンドライナックの冷却システムの模式図を図 1 に示す。

RF の位相変動は Double Balanced Mixer (DBM) を用いて測定し、RF パワーは検波器を用いて測定した。RF に寄与していると思われる各部の温度は、サーミスタにより測定した。また電源電圧は変圧器を用い、15V 前後に減圧し測定した。

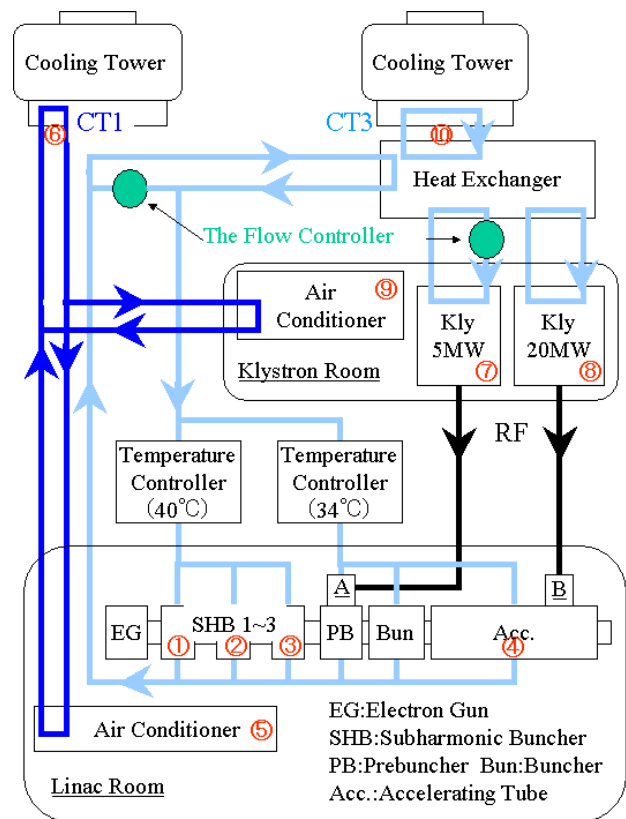


Figure 1. Schematic diagram of the temperature control system of the ISIR L-band linac and points of measurement in this experiment. The letters A and B denote measurement points for the RF power and phase. The numbers ① through ⑩ are those for temperatures. The AC line voltage was also measured.

冷却システムには空調系を冷却する“CT1”と各装置を冷却する“CT3”があり、共に屋上のクーリングタワーで冷却された冷却水が供給されている。“CT1”の冷却水はライナック室およびクライストロン室のエアコンに供給され、循環している。一方“CT3”の冷却水は熱交換器を介して、クライストロン (20MW と 5MW) と加速管各部を独立に循環する 3 系統の冷却水を冷却している。

¹ E-mail: sato25@sanken.osaka-u.ac.jp

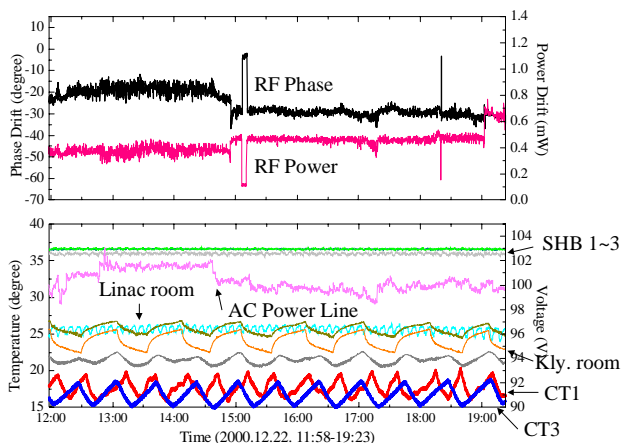


Figure 2. RF phase and power for the prebuncher measured at the point A with the various temperatures and the AC voltage on 22 December 2000. We refer to this measurement as the fluctuating case.

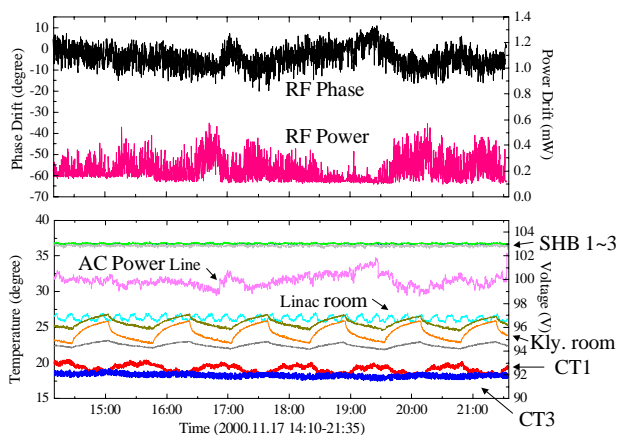


Figure 3. RF phase and power for the prebuncher measured at the point A with the various temperatures and the AC voltage on 17 November 2000. We refer to this measurement as the stable case.

またライナック各部を循環する冷却系統には温度コントローラーや流量調節装置が設置されている。特に3台のSHB側の温度コントローラーはかなり高い精度で制御されていて、その精度の良さは測定結果を見ても明らかである。5MWクライストロンにも、クライストロン温度を流量で調節可能な様ように量調節装置が設置されている。

4. 測定結果

測定日が異なる測定結果を図2と図3に示す。プリバンチャーに供給されるRFパルスについて、先頭から $5.0\mu\text{sec}$ の位置における位相とパワーの変動をそれぞれ上図に示す。電源電圧と各パラメータの温度変化は下図に示す。

図2の上図に見える2箇所のスパイクはRFを調整したことによる変動である。RFの位相変動とパワー

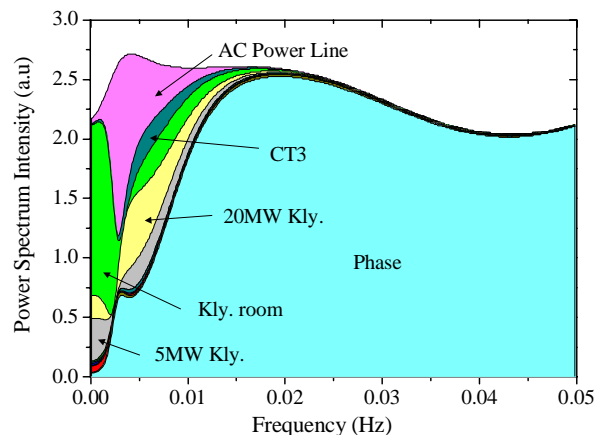


Figure 4. Various noise contributions to the power spectrum of the RF phase for the fluctuating case. The cooling water temperatures CT1 and CT3 fluctuates periodically as shown in Figure 2.

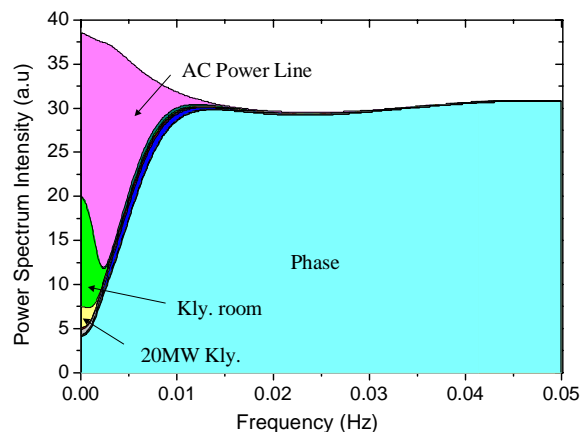


Figure 5. Various noise contributions to the power spectrum of the RF phase for the stable case. The cooling water temperatures CT1 and CT3 are stable as shown in Figure 3.

変動は電源電圧に相関があるように見える。特に図3ではそれが顕著に表れている。

また測定日による結果の違いとして注目すべきは、CT1とCT3の温度変動である。図2ではCT1、CT3ともに短い周期で変動をしている。同様にライナック室、クライストロン室やクライストロン本体も短い周期で変化をしていて、なんらかの相関があり全体的に温度が不安定である。

図3ではCT3はほぼ一定で安定している。CT1も変動はしているが、図2に比べ変動の周期は長い。ライナック室、クライストロン室やクライストロン本体の温度変動も周期が長く、比較的安定している。

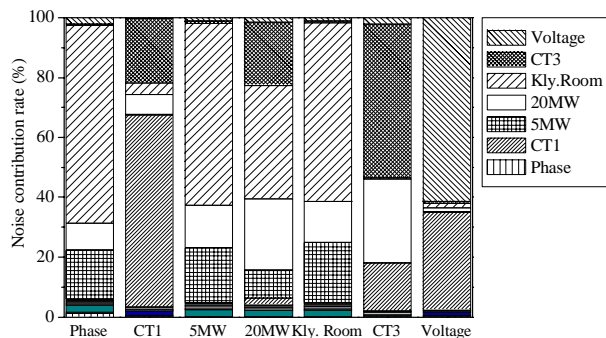


Figure 6. Percentage noise contributions to some key parameters at frequency of $91 \mu \text{ Hz}$ (3.1 hours) for the fluctuating case.

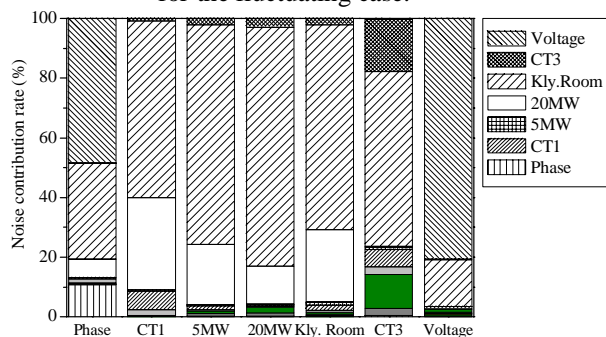


Figure 7. Percentage noise contributions to some key parameters at frequency of $59 \mu \text{ Hz}$ (4.7 hours) for the stable case.

5. 解析結果

測定データに対して自己回帰モデルを用いて解析した。各パラメータが位相変動に及ぼすパワースペクトルを図4と図5に示した。それぞれDC成分に近い部分の周波数(図4: $9.1 \times 10^{-5} \text{ Hz}$ 、図5: $5.9 \times 10^{-5} \text{ Hz}$)に対してノイズ寄与率を求めた。同様に求めた電源電圧、CT1、CT3、クライストロン室などのパラメータに対してのノイズ寄与率を図6と図7にまとめて示す。

ここまでの解析結果をもとに阪大産研Lバンド電子ライナックの長時間の変動に対する外乱要因のフィードの構造を推定した。それらを図8と図9に示した。10%以上のノイズ寄与率を矢印で表し、大きさは線の太さで表現している。冷却水の温度変動が不安定なときは、安定しているときに比べフィードバック構造が複雑である。またノイズ寄与を熱の流れとして考えると、冷却水の温度変動が不安定なときは、クライストロン設置室の熱が正常な熱の行き先であるCT1(空調冷却水)にうまく伝達されず、余剰熱がクライストロン本体やRF位相に影響を及ぼしフィードバックが複雑になると思われる。

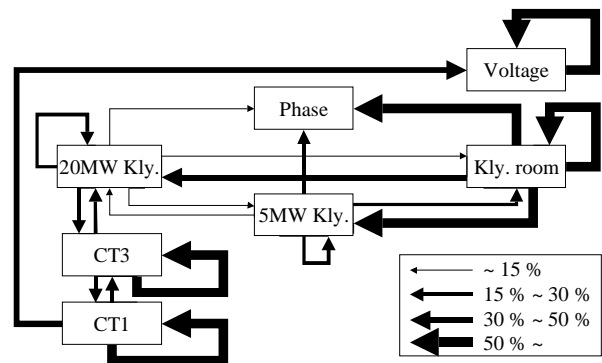


Figure 8. Schematic diagram of major mutually-related noise contributions for the long-time drift in the fluctuating case.

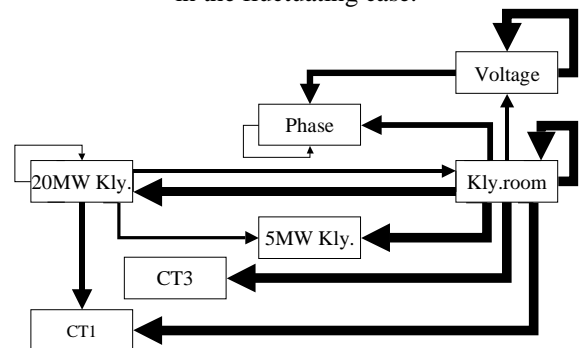


Figure 9. Schematic diagram of major mutually-related noise contributions for the long-time drift in the stable case.

さらにクライストロン室の熱がCT1に伝達され比較的安定なときも、熱の一部がクライストロン本体やRF位相に影響を及ぼしている。また測定結果から直感的に感じたRF位相変動に対する電源電圧からの影響も、解析により客観的に確認できている。

6. まとめ

阪大産研Lバンドライナックの安定化のために、電子加速に用いるRFの位相変動に影響を及ぼすと思われる様々なパラメータについて測定を行った。測定結果を自己回帰モデルを用いて解析し、ノイズ寄与率によりフィードバック構造を推定することができた。その結果、産研ライナックの長い周期変動に関しては、クライストロン室の温度が寄与してライナックのトータルシステムを複雑化している可能性が高いことが読みとれた。

参考文献

- [1] 赤池弘次、中川東一郎 “ダイナミックシステムの統計的解析と制御” サイエンス社 (1972)
- [2] H.Sakaki et al., T.SICE Vol.35, No.10 (1999) 1283