

## 論文の内容の要旨

論文題目 Verification of RF System and Thermionic RF Electron Injector for Medical Monochromatic X-ray Source  
(医療用単色 X 線源のための高周波・熱電子銃システムの実証)

氏名 坂本 文人

### 研究背景と目的

第3世代放射光施設に代表される $\sim 10$  keV の高エネルギー X 線源の登場により、医療や生命科学における単色 X 線を用いた研究が積極的に行われている。しかし、シンクロトロン放射光で $\sim 10$  keV の単色 X 線を生成させるためには、GeV クラスの高エネルギー電子ビームが必要となるため X 線源が巨大化し、利用普及には難がある。これに対し近年、線形加速器の電子ビームとパルスレーザーを用いたコンプトン散乱による X 線生成法の有効性が提唱された。この手法により、電子線形加速器とパルスレーザーによりシステムが構成されるため、その規模も、放射光施設に比べ格段に小さくなった。しかし、実用に向けては、安定化と高強度化そして更なる小型化という面での改善が急務である。このような現状と問題点を背景に、東大原子力専攻においては、文部科学省先進小型加速器開発プロジェクトに参画し、従来使用されてきた S-band(2.856 GHz)の $1/4$ の波長である X-band (11.424 GHz)線形加速器を採用した、より小型且つ大強度のコンプトン散乱 X 線源の開発を進めている。本システムの概念図を図 1 に示す。本システムは、X-band 熱陰極高周波 (RF) 電子銃及び進行波型加速管により生成・加速されたマルチバンチ電子ビームと、ロングパルス Nd:YAG レーザーを衝突させるものである。本システムによると、生成 X 線の短パルス性は損なわれてしまうが、高精度な電子ビーム・レーザーの同期技術が必要なく、最大で  $10^9$  photons/s の X 線が得られ、X 線応用利用の範囲も拡大される。電子加速の高周波として X-band を採用することで、加速空洞のシャント抵抗が高くなり加速電界をより稼ぐことができるので、システム全体の規模も飛躍的に小さくなる。しかしながら、X-band 帯域における高電界でのマルチバンチ電子ビーム生成・加速は、空洞の超精密加工や高電界下における取扱い方法など、様々な要素技術開発を含むため世界的に前例がない。そのため得られた知見をまとめる事は、今後の小型大強度加速器の開発において非常に重要な役割を持つ。

本研究では、X-band 電子線形加速器と Nd:YAG レーザーによる単色 X 線源システムの構築を行い、X-band RF 電子銃及び加速管による電子ビーム発生・加速を実施し、高電界試験を通して得られた X-band 高周波機器の高電界下における取扱いに関する知見をまとめ、さらにコンプトン散乱 X 線発生実験体系を構築し、その有効性を示す事を目的とする。

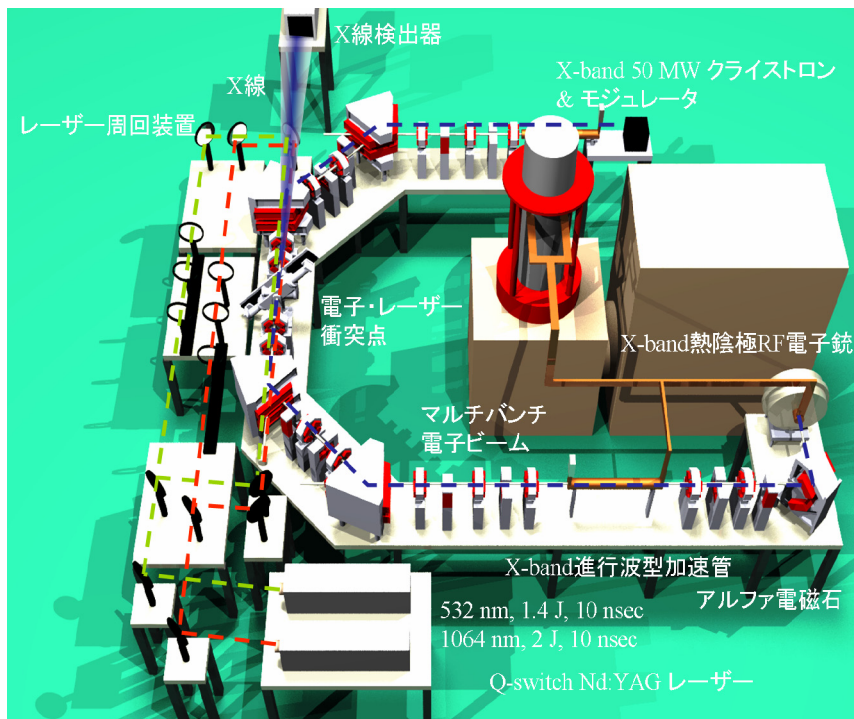


図1 小型コンプトン散乱単色 X 線源概念図

### X-band クライストロンによる大電力出力試験と熱陰極 RF 電子銃ビーム発生試験

クライストロンを含む高周波機器の高電界試験を行うに当たり、クライストロンの最大定格出力である 50 MW、パルス幅 1  $\mu$ s を達成する過程において、低電力・短パルスからの RF コンディショニングを少しずつ施す必要がある。RF コンディショニングは、電界集中による微小な放電を繰り返し起こさせながら進めていくが、その都度発生する放電現象を正しく把握して適切な対応をしなければ、大きな放電を引き起こし、高周波機器の破損を引起す。そのため、各コンポーネントにおける放電現象を適切に評価するためのモニター系を充実させた RF 立体回路を構築した。コンディショニングを進める上で重要な指針となるのは、検波器による RF 出力波形と、光電子増倍管による発光シグナルを比較し、放電が発生したタイミングを把握することである。大きな放電により発光が起きた場合、発光が始まる前まで RF パルスを短くし、放電の規模をコントロールすることが重要であり、高周波機器の保護とコンディショニングの効率化につながると言える。クライストロンの最大定格は 50 MW、パルス幅 1  $\mu$ s であるが、20 MW (2ポート合計)、400 ns まで到達するのに運転繰り返し 10 Hz において約 800 時間の運転時間を要した。最大定格は達成されていないが、X-band 熱陰極 RF 電子銃試験に必要な RF 電力とパルス幅(6 MW, 400 ns)は達成されているため、RF 電子銃試験へと移行した。

本システムでは、マルチバンチ且つ低エミッタンスビームを得るため、3.5-cell 熱陰極 RF 電子銃を採用している。電子銃の設計値は入力電力 6 MW、RF 充填時間 400 ns、電子ビームエネルギー 3 MeV、電流量 2  $\mu$ A (20 pC/bunch) であり、RF 共振モードは  $\pi$ モード

の定在波型である。電子銃のビーム発生試験を行うために、アルファ電磁石とビーム電流モニターから成るテストベンチを構築した。電子ビームのエネルギーは、アルファ電磁石内でのエネルギーの違いによる行路差を利用し、スリットを用いて高エネルギーの電子ビームのみを選別することで可能である。図2に検波器によって観測された、典型的な空洞への入力・反射 RF 波形を示す。矩形の入射電力に対し、定在波型空洞特有の2つのピークを持つ反射波形が確認できる。この入射波と反射波の差分が空洞に充填される電力となる。入力電力 6 MW、RF パルス幅 200 ns 投入の際、図2に示すようにアルファ電磁石の前後においてビーム電流の発生を確認した。アルファ電磁石により測定した、電子ビームのエネルギースペクトルを図3に示す。アルファ電磁石出口でピーク 2 MeV、エネルギー拡がり 10% である。この測定結果により、電子銃が放射線発生装置として認可された。

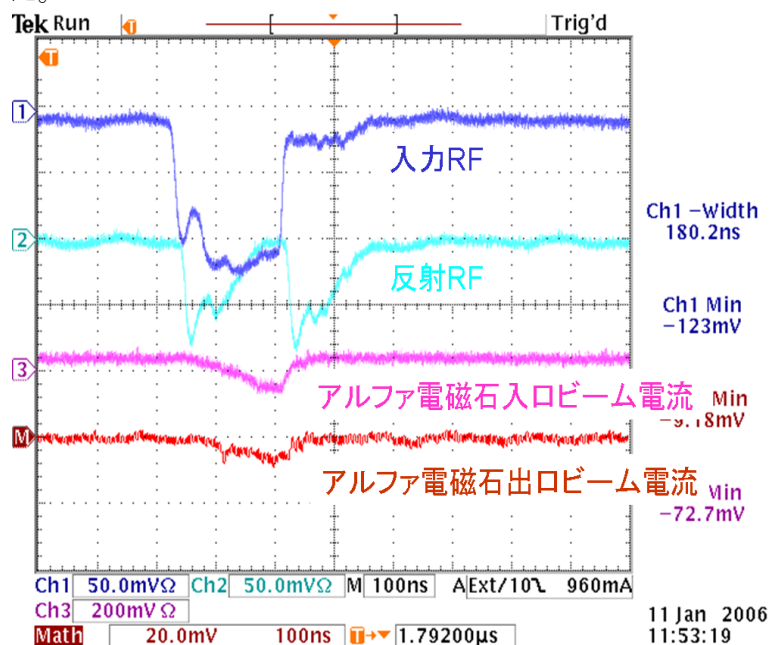


図2 空洞への入力電力波形、空洞からの反射波形、アルファ電磁石前後でのビーム電流波形

しかしながら、空洞内の放電現象の多発によりコンディショニングが進んでいない。そのため RF パルス幅が空洞充填時間よりも短く、設計値のビームエネルギーと電荷量が得られていない。放電現象が発生している箇所と原因を追究するため、空洞の内部調査を行った。熱カソード支持と RF コンタクトの目的で装填されていた SUS 製のスプリングが破壊され、そこでの放電痕が確認された。空洞内部も同様に調査した結果、銅製の空洞壁面に SUS 膜が蒸着されているのが成分分析により確認された。通常運転時、熱カソードは約 1000°C で運転しており、SUS の融点よりはるかに低い領域である。しかし、超高真空下で SUS の融点が 1200°C 近くまで下がり、更に高温状態でカソードケーシングに使用されている Mo と反応し、SUS の昇華現象が発生したと考えられる。真

空中の SUS は平均自由行程が十分長いので、空洞壁面に蒸着したと考えられる。空洞は表面抵抗の小さい無酸素銅で出来ており、SUS の蒸着は空洞の電界分布を変化させ、得られる電子ビームのパラメータを変えてしまう。そのため、空洞壁面の SUS 蒸着を考慮に入れた空洞特性解析と、その空洞における電子ビーム挙動解析を SUPERFISH と PARMELA を用いて行い、実験結果の妥当性を評価した。

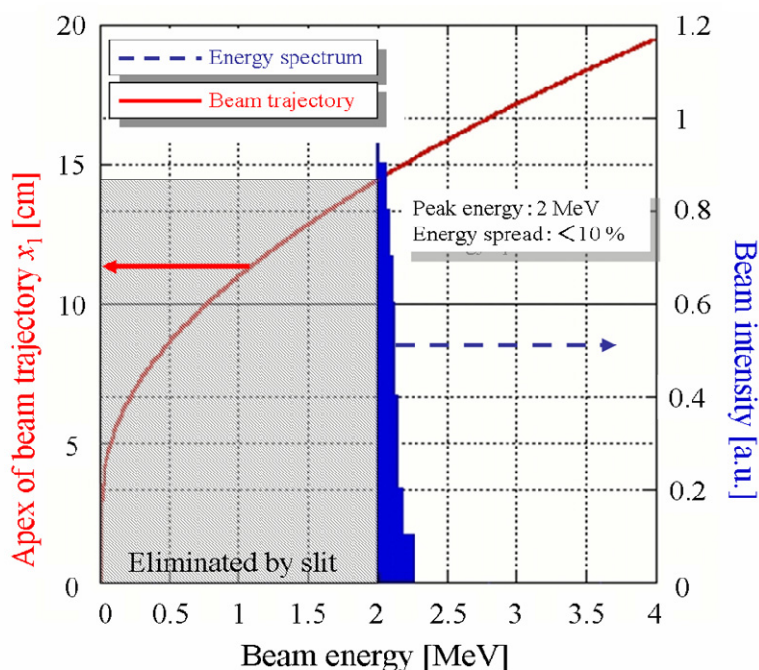


図3 電子ビームエネルギースペクトル

ビーズパーターベーション法により測定した、SUS 蒸着前後での空洞軸上電界強度分布を SUPERFISH により再現し、更にその電磁場分布を粒子トラッキングコードである PARMELA に入力し、電子銃空洞内におけるビーム挙動をシミュレートした。その結果、PARMELA によると、空洞の第4セルでの電界強度の減少により、最大で 2.8 MeV の加速に留まる結果が得られた。PARMELA による計算はシングルバンチを仮定しているが、マルチバンチ加速では、ビームローディングの効果が無視できないため、この効果も評価する必要がある。その結果、パルス後方のバンチでも平均 2.1、最大 2.5 MeV となる。200 ns においては平均 1.7 MeV、最大 2.0 MeV となるので、実験で得られた結果と比較して良好な一致であると言える。SUS 蒸着が施された空洞は、エネルギーは若干設計値より下がるものの、今後の加速試験とコンプトン散乱実験に際して影響が出る程ではないため、電子銃として十分機能すると言える。破損したスプリングであるが、真空中における融点を考慮に入れ、タングステン製のものを採用し、冷却水の循環経路の改造を行った。本実験で使用した数 MeV の X-band 熱陰極 RF 電子銃の試験は世界的にも初の試みであり、その性能評価とビーム発生を実験・数値計算両面からその妥当性を評価し、電子銃としての有用性を示した点は、今後の小型高電界加速器の発展にとって非常に重

要な成果であると言える。

### X線発生実験体系の構築とその性能評価

熱陰極 RF 電子銃の電子ビーム発生試験の成功に引続き、電子加速に必要な X-band 加速管のための高周波立体回路の構築と、コンプトン散乱 X 線発生のためのビームライン及びレーザーシステムの構築を行った(図 4)。電子加速のための加速管と高周波立体回路構築の際に様々なトラブルがあったものの、いずれも解決され順調に大電力が投入されており、これまでに加速管へ 40 MW、電子銃へ 5.5 MW の大電力の投入を達成した。世界的にも、X-band におけるマルチバンチ電子ビームの加速の実績は未だなく、本高周波システムの構築状況は非常に重要な成果と言える。一方、コンプトン散乱実験に用いるレーザー装置に関しては、光学系の構築とその性能評価を行い、電子ビームとの衝突点において、約 1J/10ns の大強度出力でありながらビームスポットの形状評価及び強度・位置の安定性を評価し、いずれも 10%以下になることを確認した。この安定度はコンプトン散乱による X 線発生試験に十分な安定度であると言える。また、コンプトン散乱実験に必要不可欠な、電子ビーム・レーザー各々を 4 次元で測定可能なビーム診断装置を構築した。

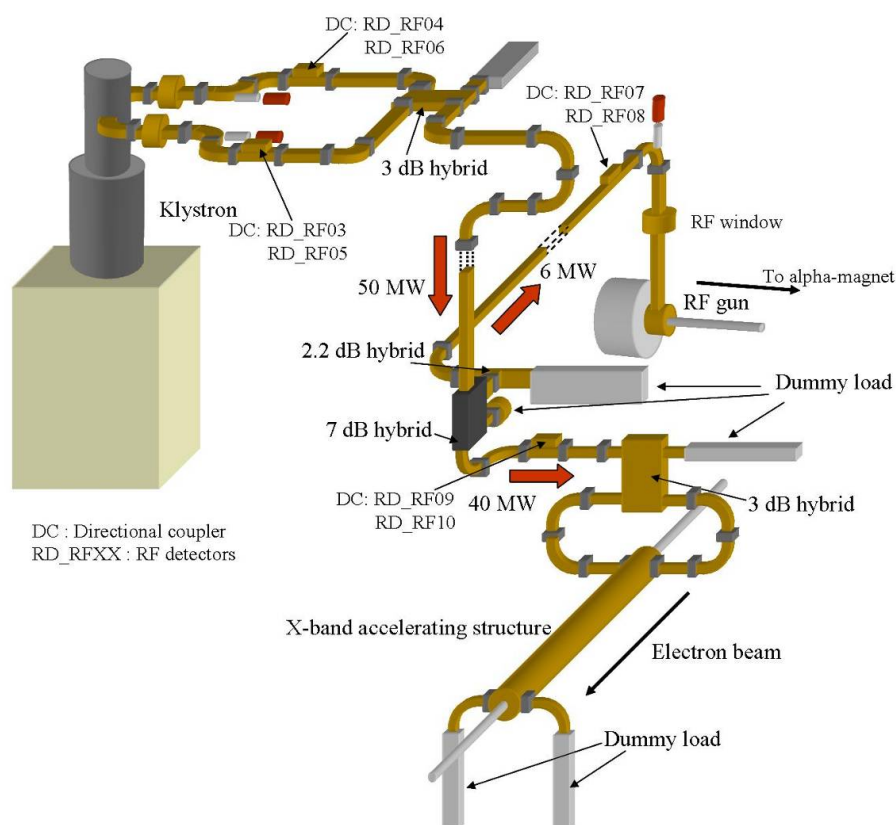


図 4 電子銃・立体回路用 X-band 立体回路

## 結論

東大原子力専攻において、X-band マルチバンチ電子線形加速器を用いた小型コンプトン散乱X線源の開発を進めてきている。本研究では、そのシステム構築と性能評価を行ってきた。X-band クライストロンによる大電力出力試験と熱陰極 RF 電子銃によるビーム発生試験を実施し、ビーム発生とその評価を定量的に行うことで、その有効性を世界で始めて実証した。これに引続き、X-band 加速管とレーザー装置を含むコンプトン散乱によるX線発生に必要な体系を構築した。X-band 加速管を含む立体回路の構築では、様々なトラブルを克服し、順調なパワー投入に成功した。また、RF コンディショニングを通じて得られた、コンディショニングの効率化につながる方針を示した。レーザー装置に関しては、性能評価を行う事で十分な安定度が得られている事を定量的に示した。

本研究で示した熱陰極 RF 電子銃によるビーム発生の実証の達成と、加速管含む立体回路の構築の成功と得られた知見は、今後の小型高エネルギー加速器の開発にとって重要な成果であると言える。さらに、レーザー光学系の構築とビーム診断装置の開発は、今後のコンプトン散乱X線発生試験へつながる、重要な研究成果であると言える。