

POSITRON FACTORY RESEARCH PLAN AT JAERI [II] -Subjects To Be Investigated From Technical Aspects-

Sohei OKADA and Yoneho TABATA*

Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment,
Japan Atomic Energy Research Institute(JAERI)

*Faculty of Engineering, University of Tokyo

ABSTRACT

The JAERI has started drafting a construction plan of a positron factory, in which intense energy-controllable monoenergetic positron beams are produced from the pair-production reaction caused by high-energy electrons from a linac. The beams will be applied to fine and precise characterization of various materials such as superconductors and semiconductors and to basic researches like atomic and molecular physics, making good use of distinctive features of a positron. An outline of the planning was given in the previous report. In this article are presented subjects to be investigated from technical aspects with regard to the specification of the linac and the design of the positron beam lines.

原研におけるポジトロンファクトリー研究計画 〔II〕—技術的検討課題について—

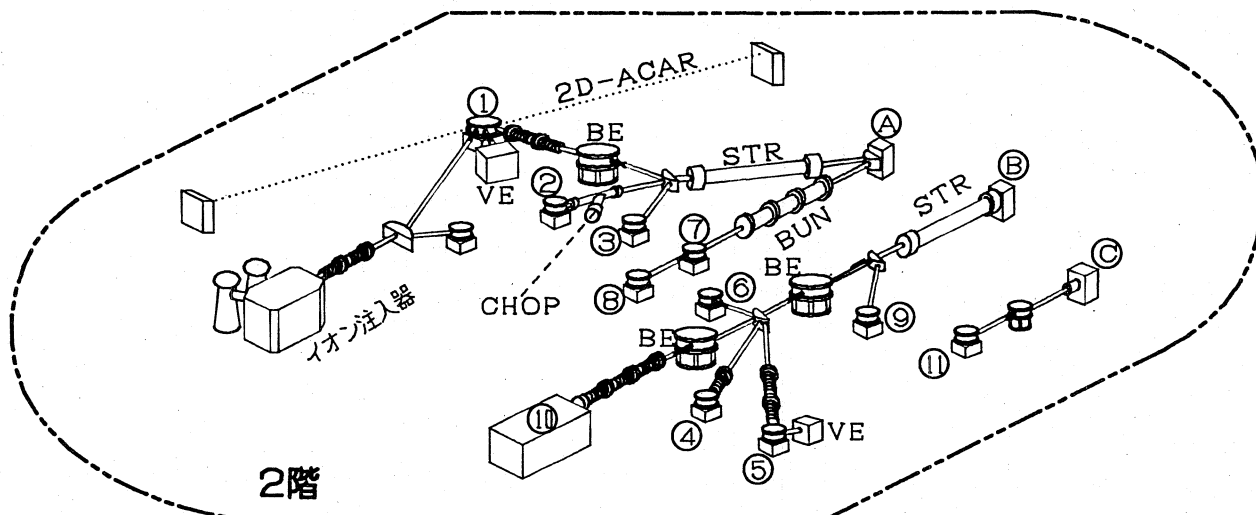
1. はじめに

原研では、高出力電子リニアックによる高強度エネルギー可変単色陽電子ビームの発生と、超電導材料、半導体材料その他各種材料の精緻なキャラクタリゼーションや原子分子物理など基礎研究への利用を中心としたポジトロンファクトリー研究計画の立案が進められている。前報では、陽電子利用の有用性、高強度化の必要性、及び研究計画の内容について、その概略を述べた。本報告では、電子リニアックの仕様、陽電子ビームライン及び施設の設計等に関するその後の検討結果を踏まえ、今後さらに検討を進めるべき課題について整理して述べる。

2. 研究計画と技術的検討課題

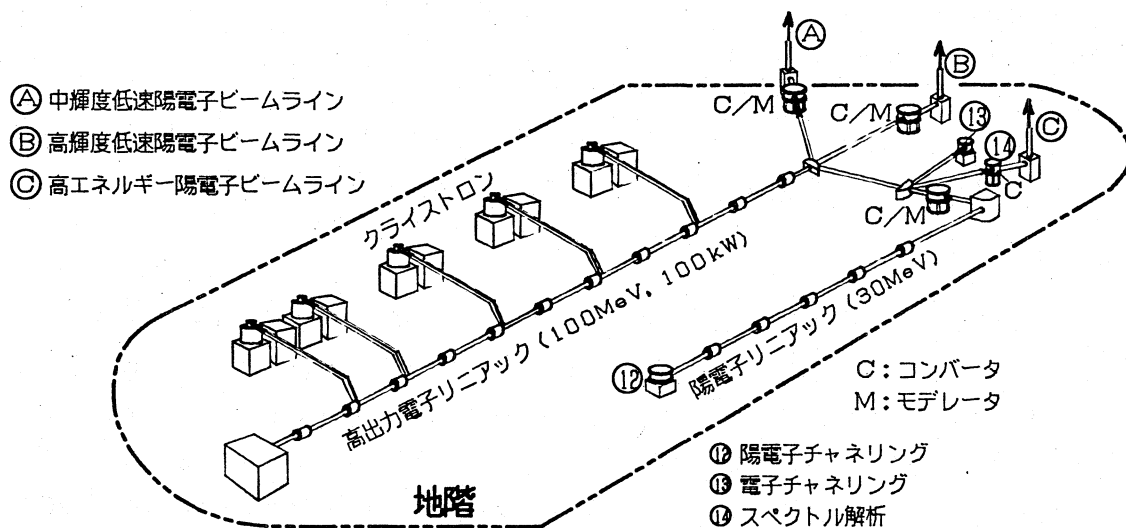
図1に、ポジトロンファクトリーの中心となる設備及び陽電子ビームラインの概念を示す。前報で述べた研究計画の各項目を、該当するビームコースエンドのポートに記してある。表1には、各ビームコースエンドにおける陽電子ビーム仕様に対する要求を示す。これらに示された計画を実現するために、現在検討中であり、また今後技術開発を進める必要のある技術的課題について以下に述べる。

[図1] ポジトロンファクトリー研究施設の設備・ビームラインの概念図



STR: DC化装置 BUN: 短パルス化装置 CHOP: ビームチョッパ BE: 輝度強化装置 VE: 蒸着装置

- ① 電子構造プロファイル測定 (2D-ACAR) ② パルス低速陽電子寿命測定 ③ 陽電子消滅励起分光
- ④ LEPD (LEED), PELS (EELS) ⑤ RHEPD (RHEED)
- ⑥ 陽電子-原子・分子散乱測定 ⑦ レプトン反応系 ⑧ Ps-TOF, Ps回折 ⑨ 再放出スペクトロスコピー
- ⑩ 陽電子顕微鏡, 陽電子マイクロアナリシス, コンパクト角相関
- ⑪ 陽電子チャネリング, 陽電子-ガンマ コインシデンス



- Ⓐ 中輝度低速陽電子ビームライン
- Ⓑ 高輝度低速陽電子ビームライン
- Ⓒ 高エネルギー陽電子ビームライン

- ⑫ 陽電子チャネリング
- ⑬ 電子チャネリング
- ⑭ スペクトル解析

(1) ターゲット技術

電子-陽電子コンバータ: 高エネルギー電子照射により, 制動放射と対生成をカスケード的に繰り返して, 陽電子を発生させるためのコンバータとしては, 臨界エネルギー, 放射化断面積, 熱伝導率, 融点などに対する考察から, タンタルが用いられており, 材質としては今後もタンタルが基本となるものと考えられる。今後の技術開発の課題としては, ジオメトリの最適設計と冷却技術の検討がある。冷却法としては, 40 kWまでなら通常の水冷法でよいという報告があるが, さらに高強度を狙うには, ローターターゲットの採用などを検討する必要がある。また, 放射化したターゲットの取扱の遠隔操作・自動化技術の開発も重要である。

[表1] 陽電子ビームコースエンドにおけるビーム仕様に対する要求

ビーム ポート	研究(測定)項目	ビーム 形態	エネルギー E ()内は安定度 ΔE	単色陽電子 電流 I	ビーム径 r	角度分散 $\Delta\theta$
①	電子構造プロファイル測定 (2D-ACAR ^{*1})	DC	数eV(0.2eV) ~50keV(0.1%)	100pA	1mm ϕ	数°
②	ハ°ル低速陽電子寿命 測定	ハ°ル	数eV~100eV (<0.5eV at 5eV) ハ°ル巾:<100ps	1個/pulse ($10^5 s^{-1}$) ハ°ル間隔:10 μs (100kHz)	<5mm ϕ	-
③	陽電子消滅励起分光	DC	数eV(<0.5eV)	1nA	<5mm ϕ	-
④	LEPD ^{*2}	DC	10eV~5keV (0.2eV at 100eV)	100pA	0.1mm ϕ	1°
	PELS ^{*3}	DC	数eV~1keV (数meV at 10eV)	100pA	1mm ϕ	数°
⑤	RHEPD ^{*4}	DC	100eV~50keV (0.2eV at 100eV)	100pA	0.1mm ϕ	1°
⑥	陽電子-原子分子散乱 測定	DC	数eV~1keV (0.2eV at 100eV)	100pA	0.1mm ϕ	1°
⑦	Li°反応系の研究	ハ°ル	数eV~5keV (<0.5eV at 5eV)	検討中		
⑧	Ps-TOF, Ps回折		ハ°ル巾:~100ps, ハ°ル間隔:1ms(1kHz) (検討中)			
⑨	再放出ス°ク°ロ°ス°	DC	1~5keV(0.1%)	1nA	<5mm ϕ	-
⑩	陽電子顕微鏡, マイクロカ タ, コンパ°外角相関	DC	100eV~100keV (0.2% at 100keV)	10pA	1 μm ϕ	数°
⑪	陽電子チャネリング [°] , 陽電 子-ガ°マ コンシ°ネ°ス	ハ°ル	10keV~10MeV (数10%)	10pA(平均)	<5mm ϕ	-
		ハ°ル巾, ハ°ル間隔:コンパ°タからの出力そのまま				
⑫	陽電子チャネリング [°]	ハ°ル	5~30MeV(1%)	200pA (平均)	<5mm ϕ	数°
		ハ°ル巾, ハ°ル間隔:(検討中)				

- *1 2次元消滅 γ 線角度相関測定 *2 低速陽電子線回折 *3 陽電子エネルギー損失分光
*4 反射高速陽電子線回折

陽電子モデレータ: コンバータから発生するエネルギー分布を持った陽電子を減速し, 表面の負の仕事関数を利用して単色化した低速陽電子ビームとして取り出すモデレータとしては, これまで種々の材質のものが検討されてきたが, 現在はベネチアンブラインド状あるいはリボン状のタンゲステンが主流になっている。モデレータの効率向上は, 陽電子ビーム高強度化のための重要なポイントなので, 今後FA(Field-Assisted)モデレータ(シリコンにシリサイドを蒸着して電場をかける)や固体希ガスなど新方式のモデレータの可能性に対する検討も進める必要がある。また, 定常的に単色陽電子ビームを発生させることが要求されるポジトロンファクトリーでは, 透過電子線によるモデレータの照射損傷が問題になると予想される。というのは, 減速され熱化した陽電子は欠陥に捕捉されやすいため, 損傷により効率が著しく損なわれるからである。これに対しては, コンバータ-モデレータのジオメトリーの最適設計を進めるとともに, 自動アニー

ル機構など損傷回復策を検討する必要がある。

なお、現在までに達成されている、コンバーターモデレータを通しての電子-低速陽電子変換効率 ε_{CM} は、大体 10^{-6} である。

(2) 陽電子ビーム制御技術

DC化：パルス電子リニアックから得られる陽電子ビームは、多少なまっているにしてもやはりパルス状であるため、このままでは表1に示す電子構造プロファイル測定はじめ多くの測定の場合検出器が飽和してしまう。そこでこれらの測定のためのビームラインでは、パルス状陽電子ビームをDC化(“直流化”あるいは“平滑化”)する必要がある。このための方策としては、ソレノイド磁場により低速陽電子の散逸を抑えながら、電場ポテンシャルの間を往復させることによって一旦ビームを蓄え、徐々に取り出す“直線ストレージ法”が、電総研などで成功をおさめている。これにより、殆どビームロスなしにDC化する(DC化における変換効率 $\varepsilon_{DC} \sim 1$)ことが期待できる。

輝度強化：表1に示すように、LEPDなどの回折実験や陽電子顕微鏡では、ビーム径や角度分散の小さい高輝度ビームが必要である。このためにはまず低速陽電子ビームを数keVに加速したングステンなどの陽電子再放出性金属(リモデレータ)に打ち込む。加速には、光学系によりビーム径を絞ること(エミッタンスは変化しない)と、リモデレータ中で熱化して消滅せずに表面まで戻ってくるような丁度良い深さ(拡散距離)に陽電子を打ち込むという2つの目的がある。このようにすると、リモデレータ表面の極く限られた狭い領域から、表面ポテンシャルに押し出されて、エネルギーと方向のそろった低速陽電子ビームが得られ、Liouvilleの定理による制約を逃れて輝度の向上したビームが得られる。この輝度強化(Brightness Enhancement)における変換効率 ε_{BE} は、反射型のリモデレータを用い、加速-再放出を2回繰り返すのを1セットとして、現在のところ大体0.1である。今後の技術開発課題としては、FAモデレータなどの可能性を検討し、光学系との組合せの容易な透過型リモデレータを開発することにより効率の向上を図ること、ビーム輸送系の磁場や地磁気の影響を取り除く方式を検討すること等がある。

タイムバンチング：表1の②パルス低速陽電子寿命測定などのタイミング測定では、高い時間分解能と高い繰り返し周波数を持ったパルスビームが必要である。このためには、現在のところ、一旦DC化したビームをチョッピングする方式を検討中であるが、最表層の観測のために必要な低速ビームで、パルス巾を100ps以下にするなどの要求を満たすためには、今後かなりの技術開発が必要である。⑦のレプトン反応系の研究のためには、Ps(ポジトロニウム：陽電子-電子よりなる水素様原子)などのレプトン系を高密度で発生させる必要があり、陽電子ビームに対して $10^6/(1\mu\text{mの球})$ というような要求がある。このために、電子リニアックの1パルスによって得られる陽電子をさらにバンチングすることにより時間的、空間的に稠密なビームを得るか、あるいはDC化の場合と同じようにリニアックパルスの時間構造を利用せずに電磁的に陽電子を狭い空間に閉じ込めるかについては議論の分かれるところであり、今後ビーム要求に対する実現可能性も含めて検討を進める必要がある。⑧のPs-TOFについては、現在のところ電子リニアックパルスの時間構造を利用することを考えている。Ps回折の方式についてはまだ検討が進んでいない。⑩⑪の陽電子チャネリング、陽電子-ガンマコインシデンスについては、パルス状陽

電子のままが良いのか、DC化した方が良いのか、陽電子リニアックの仕様も含めて今後の検討課題である。

(3) 高出力電子リニアックの仕様

高出力電子リニアックの仕様に関する暫定的な検討結果を表2に示す。

[表2] ポジトロンファクトリーで必要な高出力電子リニアックの仕様

ノーマルモード (DCビーム用)	最大ビームエネルギー:100MeV, 最大ビーム電流:1Apeak, パルス巾:1μs, パルス繰り返し:1000pps, 最大ビーム出力:100kW
シングルバンチモード (Ps-TOF等用)	最大ビームエネルギー:100MeV, バンチビーム電荷量:10nC/pulse, パルス巾:100ps, パルス繰り返し:1000pps

エネルギーは、これまでの各研究機関のデータや放射化の問題を考慮して半定量的に決めたものであり、今後コンバーターモデレータのジオメトリー等も考慮して詳細な検討を行う必要があるが、大幅な変更は無いものと思われる。エネルギーをこれ以上上げるよりもむしろ大電流を狙った方が有効であるとの考えから、平均電流1mAとした。これは、例えば表1に示すように、陽電子顕微鏡に10pAのマイクロビームが必要であるとする、輸送系でのビームロスがなく、 $\epsilon_{DC} \sim 1$ であると仮定しても、 $\epsilon_{BE} \sim 0.1$ の輝度強化を2セット行う必要があるため、nAオーダーの低速陽電子発生が必要となり、さらに $\epsilon_{c/n} \sim 10^{-6}$ であることを考慮して導かれた値である。シングルバンチモードの仕様は、このパルスの時間構造を利用してレプトン反応系の研究などを行おうとすると満足に行くものではないが、ノーマルモードの仕様とともに、費用対効果をも考慮し、今後のリニアック技術の進展を見つつ検討を進めていきたい。

(4) その他

建家の最適設計：図1に示すように、電子リニアックは地階に設置し、陽電子ビームラインの大部分は2階に配置することとした。ターゲット部分上方の1階にあたる部分は厚さ4m以上のコンクリート遮蔽とした。今後、詳細な遮蔽設計を進め、施設・設備の拡張性も考慮して建家の最適設計を行って行く必要がある。

電氣的グラウンド：陽電子顕微鏡を例にとると、まずターゲット部で、ほぼ0eVの低速陽電子が発生し、DC化された後、輝度強化のため一旦数keVに加速され、リモデレータから再び低速陽電子として取り出され、さらにこの過程を繰り返した後、最終的に試料部に100keVのエネルギーで入射されねばならない。このように陽電子ビームラインは不可避免的に複雑な電氣的構造を持つことになる。このため、安全性、簡便性及び陽電子エネルギーの安定性の3者を考慮し、電氣的グラウンドをどこに定めるのかをも含めた最適設計が必要になる。

計測系等の開発：コンパクト角相関やPs回折を行うためには、小型高分解能高効率位置敏感 γ 線検出器の開発が必要である。さらに、ポジトロンファクトリー全体として、測定・解析の効率化のため、高速フーリエ変換等の機能を有するコンピューターシステムとの連動が必要である。