

核理研の現状と次期計画

鳥塚 賀治 (東北大. 核理研)

I はじめに

核理研は昭和52年12月9日に創立10周年記念の行事を行なうことになっている。核理研の電子ライナックは、世界で大規模なものに数えられ、それを利用して行なわれた研究はそれぞれの分野で成果があがり、この10年間において国際的評価を確立することができたといえよう。

しかし、日進月歩の科学と技術の世界においてその優位を10年間続けて維持することは至難なことである。この間に強かな新鋭加速器がサッフレ(フランス)とMIT(アメリカ)に完成し、アムステルダム(オランダ)は1979年の完成をめぐしている。

我が国においては、2.5 GeVの入射用電子ライナックの建設が高工研において来年度から始まり、電総研では懸案の600 MeVの強かな電子ライナックの建設がいよいよ実現しようとしている。核理研においては、数年前から次期加速器について検討を行なってきた。先づ今後における原子核物理の発展の方向と研究課題について考え、それを達成するための加速器について検討した。ここでは先づ、II章で世界の電子加速器の現状について述べ、III章で各国の動向について、VI章で次の時代の核物理学について考察し、V章で1000 MeV、100 μ A、100% duty cycle (DC)の次期加速器について述べる。

II 電子加速器の現状

世界中には 数100台の電子ライナックがあると言われているが、その中で数10台が原子核研究用として働いている。その中の主なものを duty cycle で分類して表に示すことにしよう。

第1表 各国のデューティサイクル 0.1%以下の電子ライナック

国名	設置場所	最大エネルギー (MeV)	最大電流 (mA)	ビームパルス巾 (μ s) / くりかえし (pps)	ビームデューティサイクル	加速管全長 (m)
西ドイツ	ダームシュタット	70	60	5/150	7.5×10^{-4}	6.6
	マインツ	350	250	4/150	6×10^{-4}	40
ベルギー	ゲント	90	400	3/300	9×10^{-4}	6
ベルギー	グラスゴー	130	300	3.5/240	8.4×10^{-4}	18
	ハウエル	55	500	2/200	4×10^{-4}	20
	ハウエル	135	1000	5/300	1.5×10^{-3}	24
ソビエト	カルコフ	280	15	1.5/50	7.5×10^{-5}	48
	カルコフ	1500	25	1.5/50	7.5×10^{-5}	225
	モスクワ	60	1000	5.5/50	2.7×10^{-4}	20
カナダ	サスカチワン	280	300	1/360	3.6×10^{-4}	24
アメリカ	モントレイ	110	25	1/60	6×10^{-5}	9
	スタンフォード	1200	30	1.3120	1.6×10^{-4}	93
	NBS	150	350	5/360	1.8×10^{-3}	30
	イエール	70	750	4.5/200	9×10^{-4}	15
日本	原研	190	350	3/150	3×10^{-4}	13
	仙台	280	100	3/300	9×10^{-4}	32

先づ、*duty cycle* 0.1%以下の場合について第1表に示した。東北大学電子ライナックはこの中に含まれており、最高エネルギーが280 MeV、ピーク電流100 mA、パルス巾3 μ sで繰返し300 pps、*duty cycle* 9×10^{-4} である。原子核の研究に特に活躍しているのがダームスタット(ドイツ)、グラスゴー(イギリス)、マインツ(ドイツ)、サスカチワン(カナダ)、NBS(アメリカ)、東北大学(日本)の電子ライナックで、この表のスタンフォード(アメリカ)の1200 MeVライナックは、過去に輝しい業績を上げたが、現在は殆んど使われていない。

この型のライナックの出力ビームのエネルギー巾は2%程度であるが、最近マインツおよび東北大学においてはエネルギー圧縮装置(ECS)をつけることにより、エネルギー巾を0.2%に改善し、ターゲットにおける電流が約10倍に増加した。

第2表 デューティサイクル数%の中間エネルギー電子ライナック

設置場所	サックレー (フランス)	M I T (アメリカ)	アムステルダム (オランダ)	電総研 (日本)
最大エネルギーと デューティサイクル	600MeV 2%(400MeV)	430MeV 2%(400MeV)	500 MeV 8%(250 MeV)	600 MeV 0.1~0.7%
くりかえしと パルス巾	3000pps 20 μ s	5000 pps 13 μ s	2000 pps 45 μ s	
ピーク電流	40mA	25 mA	20 mA	70 mA
平均電流	350 μ A	250 μ A	500 μ A	300 μ A
エネルギー巾 E/E	0.3%	0.3%	0.3%	
クライストロン数 ピーク出力	154MW	10/4MW	12/4MW	13/7~12MW
加速管長	170m		180m	76m

第2表に最新型の電子ライナックが示されている。ここではクライストロンのピーク電力を下げ *duty cycle* を数%としているのでクライストロン数が増加すると共に加速管が長くなり、第1表のものに較べて建設費と維持費が数倍になっている。サックレーとMITの電子ライナックは現在活躍中で、アムステルダムは建設中で1979年に完成予定である。我が国においては電総研がこの種のを建設しようとしている。これらの魅力はなんとい、ても同時計数法による実験が可能だということである。更に一歩進め100% *duty cycle* を実現するために超伝導ライナックが考えられた。超伝導空洞は 10^9 程度のQ値を得ることができて、Cuの 10^4 に比較して著るしく高い。従って僅かな電力により高い電場を空洞内に発生させることができるので、連続発振(CW)による連続ビームを得ることが可能である。

最初の超伝導ライナックの建設は、2 GeV、100 μ Aを目ざしてスタンフォードの高エネルギー研究所(HEPL)で10年程前から始まった。当初の計画では超伝導空洞の耐電圧を30 MeV/mと想定したが、実際の加速テストの結果、それよりも低い電場で破壊現象が起、ていることがわかった。この問題は現在に至、ても解決せず、目標よりはるかに低い60 MeV程度の加速ビームが得られているにすぎない。超伝導ライナックによる100% *duty cycle* は魅力的であるが、実用化するためには新しい超伝導物質の開発、表面処理技術の進歩が必要であらう。

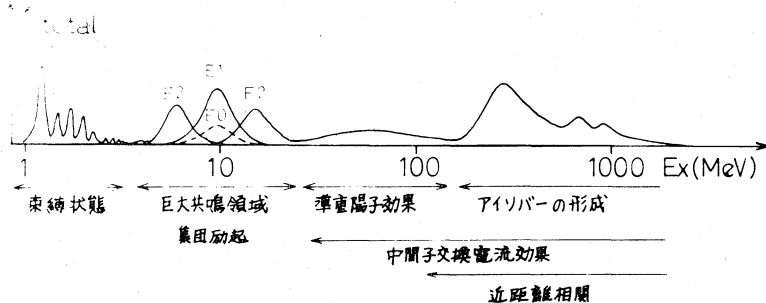
III 各国の電子加速器の動向

各国の主な電子加速器の動向は次の如くになっている。

- (1) MIT (アメリカ) の 430 MeV 電子ライナック (第2表) は、1974年に完成したばかりであるが、リサイクルしてエネルギーを800 MeVにしようとしている。
- (2) マイッツ (ドイツ) は350 MeV 電子ライナック (第1表) を東北大学と同時期に完成したが、次期加速器として820 MeV、100 μ A、100% *duty cycle* の3段階マイクロトロン建設に着手している。
- (3) アムステルダム (オランダ) は東北大学と同じ頃90 MeV ライナックを完成したが、2年前から停止し、今500 MeV 数% *duty cycle* ライナック (第2表) を建設中である。1979年に完成の予定である。
- (4) サスカチワン (カナダ) は東北大学と同時期に130 MeV を完成したが、1975年に増強してエネルギーを280 MeV にした (第1表)。蓄積リングにより100% *duty cycle* ビームにする計画がある。
- (5) スタンフォード超伝導ライナックは、4回リサイクルしてエネルギーを225 MeV にすることを計画している。
- (6) イリノイ超伝導マイクロトロンは、増強してエネルギーを200 MeV に上げようとしている。
- (7) NBS (アメリカ) は現在150 MeV 電子ライナックがあるが、レーストラック方式で3回繰返し225 MeV、10 μ A、100% *duty cycle* を得ることを計画している。
- (8) グラスゴー (イギリス) はエネルギーを130 MeV (第1表) から300 MeV にし、ビームストレッチャーをつける計画がある。
- (9) ルンド (スウェーデン) はマイクロトロンで100 MeV まで加速し (パルス運転)、更にリングをつける計画に着手している。
- (10) 電総研は昭和38年に29 MeV 電子ライナックを完成したが、次期加速器として600 MeV 構想を持ち (第2表)、筑波に建設の予定である。
- (11) 高工研 (日本) はSORの入射器として2.5 GeV、2 μ s、50 pps、50 mA (ピーク)、0.01% *duty cycle*、平均5 μ A の電子ライナックを計画している。これは第1表のスタンフォード、カルゴフのライナックによく似ている。

IV 次の時代の原子核物理

原子分子の研究に、光や電子の果たした役割はよく知られているが、原子核の研究においても電磁相互作用の重要性についてようやく認識されつつある。原子分子の研究には 10^{-8} cm (オングストローム) 程度の波長の光が用いられるが、原子核においてはその波長は 10^{-13} cm (フェルミ) 程度となる。数10 MeV のガンマ線の波長は原子核の大きさと同程度で数100 MeV になると原子核を構成する核子と直接相互作用をするようになる。



第1図 ガンマ線の全吸収スペクトラム、数MeV以下が束縛状態 8~50MeVが巨大共鳴領域、50~140MeVに準重陽子効果があり、140~1000MeVにおいてはアイソバー（核子の励起状態）が形成される。

第1図に原子核による光の全吸収スペクトラムが示されている。横軸が励起エネルギーでガンマ線のエネルギーに相当し、縦軸にその吸収の強さを表わしている。この図に示されるように数MeV以下にたくさんのピークが存在し、粒子放出が起らないので束縛状態といわれている。ここでは個々の原子核の特徴が表われ、従来の原子核研究はこの領域に集中していた。低エネルギー核物理といわれる。

励起エネルギー10~50MeVがいわゆる巨大共鳴領域で原子核全体の運動が起きている。この領域は始めて核理研電子ライナックにより研究され、E0、E2、E3等の新巨大共鳴の存在が確立されつつある。この発見によりこの領域の研究は非常に活発になっている。

巨大共鳴以上から π 中間子の発生する140MeVまでは平坦な領域であるが、予期以上に陽子や中性子の放出が起、ていることが知られている。これを準重陽子効果という。300MeV附近のピークは中間子の発生によるもので、原子核を構成している核子との直接反応により中間子放出が起、ている。デルタ等のアイソバーが形成され、新自由度の導入により従来の原子核は変貌しつつある。

今後新現象を期待するとすれば100~1000MeVの中間エネルギー領域となるであろう。その実験の大部分は、入射粒子と放出粒子との間の相関、放出された粒子間の相関等を調べることで、同時計数法によ、て行なわれるであろう。又大部分が微小断面積の実験になるので、強かな電子ビームの加速器が必要である。断面積は一般に入射粒子のエネルギーと共に減少するので、電流強度によりエネルギーの上限が決るであろう。最大エネルギー1GeVに対して100 μ Aが必要である。

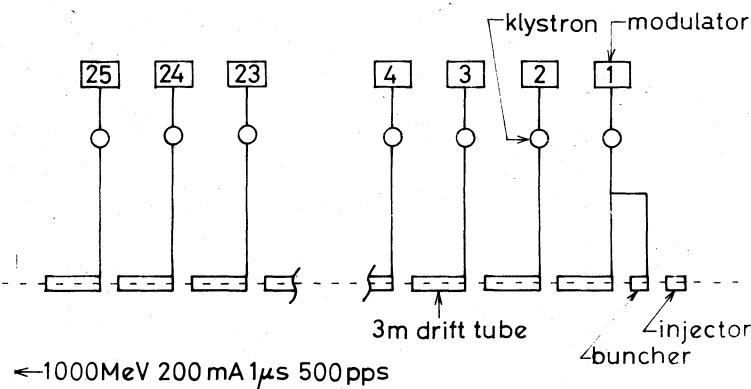
V 1GeV、100 μ A、100% duty cycle電子加速器

上記の電子加速器として具体的には、(1)超伝導ライナック(スタンフォード)、(2)従来型の電子ライナックのCW運転のレーストラック方式(NBS)、(3)多段階方式のマイクロトロン(マイソツ)、(4)パルスライナック+パルスストレッチャー(蓄積リング)等が考えられる。核理研の次期加速器は、多目的利用を考えてパルスと100% duty cycle ビームの両方が可能な(4)の方式が良いと考えている。

以上述べた(1GeV電子ライナック)+(パルスストレッチャー)におけるライナックはクライストロン+加速管(~3m)の25単位からなり、第2図の如く構成されている。クライストロンはピーク25MW、RF duty cycle 1×10^{-3} の平均25kWを考えている。この出力を3mの加速管に供給すると45MeV

で 200 mA のピーク電流を得ることが出来る。15 MeV/m の勾配は、現在の技術で可能な値である。

1000MeV Electron Linac



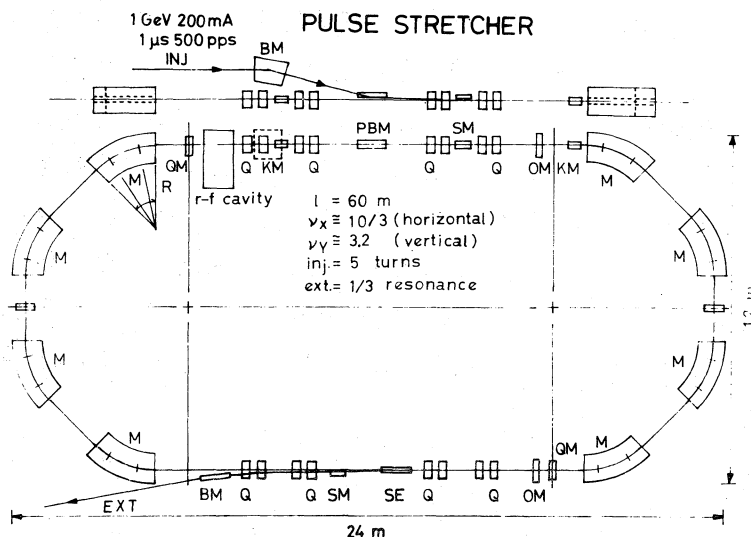
第2図 1000MeV, 200mA ピーク100μA 平均500pps
を25単位で実現する。

クライストロンパルサー、冷却系は各単位毎にできるだけコンパクトにつくる。25単位の運転は計算機制御によって行なわれる。総合的性能は第3表のようになるであろう。

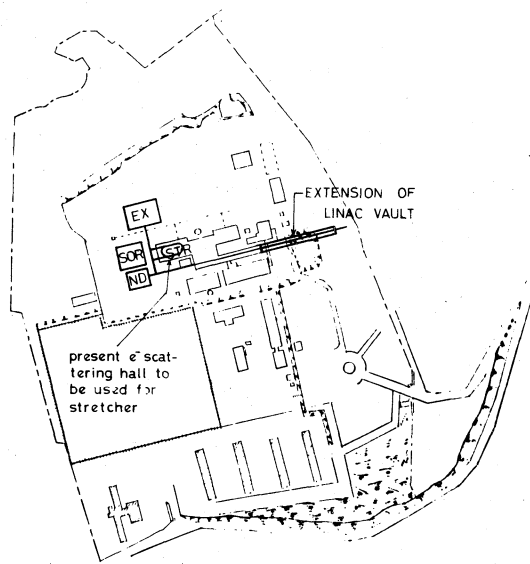
第3表

エネルギー	最大電流	ビームパルス巾/くりかえし	平均電流	加速管全長
100~1000MeV	200mA	1μs / 500pps	100μA	75m

第3図にパルスストレッチャーが示される。リングの一周は60mであるが1μsに電子は300m走るの、5ターン入射になる。従って蓄積される最大電流は1Aである。取り出しはベータートロン振動の共鳴を利用して行なわれ2msの間続く。理想的にいけば100μAの電流を得ることができる。



第3図 パルスストレッチャー一周は60mで5ターン
(1μs)の入射を行ない2msの間に取り出す



第4図 1GeVライナックのための300MeVライナックの拡張とパルスストレッチャーの設置場所を示している。

第 4 表

昭和	30	35	40	45	50	55	60
電子ライナック研究開始 (科研)	単空洞電子加速 (科研)	5 MeV ライナック (片平丁)	30 MeV ライナック (核理研)	300 MeV ライナック (核理研)		次期加速器準備研究	建設

1GeV電子ライナックとパルスストレッチャーの設置場所としては、現在の300MeV電子ライナック施設を最大限に利用することが考えられる。その場合には、第4図に示す如くなり、今の加速管本体室は60mあるが、入射器側を延長して120mとする。今の電子散乱と中性子回折(ND)に利用している第2実験室にパルスストレッチャーを設置し、原子核用とNDの実験室は別につくる。

タイムスケジュールは第4表の如く考えられる。この中に東北大学における電子ライナック研究の歴史も示している。電子ライナック計画は昭和25年に始まり、昭和32年に単空洞による電子加速、34・35年に5MeV電子ライナック、38・39年に30MeV電子ライナック、41・42年に300MeV電子ライナックを完成させた。次期加速器については、昭和52年~56年に準備研究を行ない、昭和57年から4年間で完成する。