

The 20 Year of JAERI-LINAC

Katsuo MASHIKO

Department of Physics, JAERI

Shirane 2-4, Shirakata, Tokai, Ibaraki, Japan

ABSTRACT

Since the 120 MeV electron linac was constructed at JAERI in 1972 by replacing the old 20 MeV linac, the operation and improvement of the JAERI-LINAC have been continued. The activities of the JAERI-LINAC for these twenty years are briefly reviewed. The experiences through the electron linac operation, improvement and maintenance works are summarized.

原研LINACの20年

1. はじめに

日本原子力研究所(JAERI)東海研究所で稼働されている120 MeV 電子線型加速器(JAERI-LINAC)は、旧20 MeV LINAC(1960年H.V.E.C.製)の性能を増力して、主として中性子核物理用中性子源を建設することを目的に、旧LINACの蓄積技術を活かし、自家製作により1972年3月に完成した。

このLINACは、中性子核断面積測定テーマを中心とした運転と保守整備が続けられてきた。これと平行して中性子核断面積測定実験の測定精度、測定能率向上を目指し、電子銃、加速管、パルス変調器を中心としたLINACのハード面の改良と改造をすすめて、性能向上を行った。この結果は、LINACの設計性能を大幅に超える120 nCの最大出力をパルス繰返し600 ppsの最大パルス繰返し数において実現させる事ができ、中性子核断面積測定実験に大きく寄与した。諸外国における電子LINACによる中性子源をまとめたものがTable-1である。JAERI-LINACの性能は、諸外国に比較してどうか追いついたと思われるレベルであった。

1980年代中頃より自由電子レーザー(FEL)実験、低速陽電子発生と利用、中性子ラジオグラフィなどの実験の他に、JAERIに大型放射光施設SPring-8用の入射器の開発が進められるようになった。現在LINAC棟には小型電子蓄積リング(JSR)が据付けられて、JAERI-LINACからの入射運転も行われている。

1980年代中頃より自由電子レーザー(FEL)実験、低速陽電子発生と利用、中性子ラジオグラフィなどの実験の他に、JAERIに大型放射光施設SPring-8用の入射器の開発が進められるようになった。現在LINAC棟には小型電子蓄積リング(JSR)が据付けられて、JAERI-LINACからの入射運転も行われている。

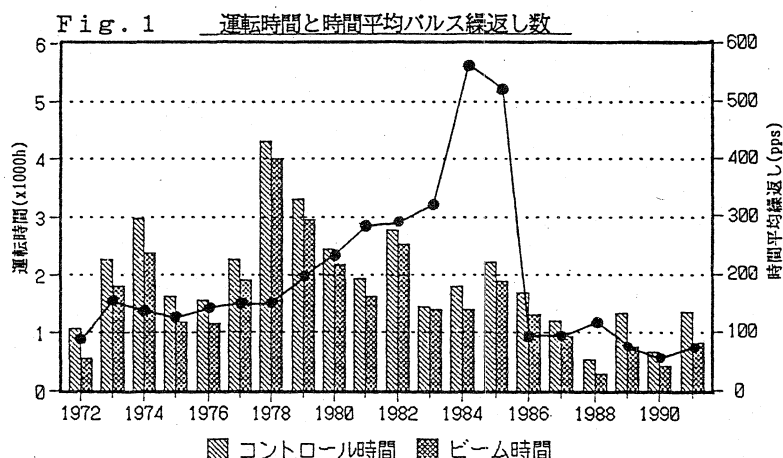
Table-1 諸外国における電子LINAC中性子源

Source	Target	Particle Energy [MeV]	Peak Pulse Current [A]	Minimum Pulse Width [ns]	Maximum p.r.f. [Hz]	Flight Path Lengths [m]	Neutron Production Rate in Pulse [n/s]
GELINA	U	120	>100	0.6	900	8 - 400	6. x 10 ¹⁹
HELIOS	U	94	6	5	2000	4 - 400	2.2 x 10 ¹⁸
JAERI	Ta	120	6	20	600	15 - 190	1.4 x 10 ¹⁸
KURCHATOV	U	60		50	900	10 - 300	2.9 x 10 ¹⁷
LIVERMORE	Ta	115	10	5	1440	7 - 250	2.3 x 10 ¹⁸
N.B.S.	Ta	120	4	5	720	20 - 200	~1. x 10 ¹⁸
ORRELA	Ta	140	15	3	1000	10 - 200	4. x 10 ¹⁸
R.P.I.	Ta	80	1	10	720	10 - 250	1.6 x 10 ¹⁷

2. LINACの運転

120 MeV LINACは1972年3月に完成し、4月より試運転が開始された。LINAC完成直後の1972年4月から1992年3月までの毎年度の運転時間と年間時間平均パルス繰返し数をFig.1に示す。当初の運転では加速管、導波管などを徐々にマイクロ波電力により真空エージングを行い、同年5月中旬には電子エネルギー90 MeV、尖頭電流25 mA、パルス幅2 μsecでパルス繰返し数50 ppsの電子ビームを初めて加速できた。その後はマイクロ波特性などの測定を行いながら調整運転を続け、パルス繰返し数と尖頭電流を増加させ、8月には電子エネルギー100 MeV、尖

頭電流 ~ 600 mA、パルス幅 $0.5 \mu\text{sec}$ でパルス繰返し数が 150 ppsに達し、研究実験のための定常運転を開始した。LINACの運転は、1992年3月まで毎年度継続して行っており、この20年間の総運転時間は、コントロール時間（給電時間）が $38,662.40$ 時間で、電子ビーム加速時間は $31,435.58$ 時間であった。20年間の研究テーマ毎の電子ビーム加速時間の中で、主たるテーマである中性子核断面積測定実験は、全電子ビーム加速時間の 67.3% を占有した。



JAERI-LINACの運転は、Fig.1に示すとおりで運転開始から15年目頃まではパルス中性子源としてパルス繰返し $300, 450, 600$ ppsの長時間連続運転も続けられた。LINAC運転の安定度と信頼性は、長時間運転中のインターロック停止回数で決まるが、パルス繰返し 300 ppsで、インターロック停止なしに 50.8 時間の最長運転持続時間の記録も得られている。（ 60 MWパルス変調器6台、 3 MW電子銃パルス変調器1台）

1986年頃より中性子核断面積測定実験のslow downにより、LINAC運転時間は減少した。この時期には新たに、低速陽電子発生と利用、中性子ラジオグラフィのテーマが入った。また、自由電子レーザー(FEL)実験、大型放射光施設計画推進グループの小型電子蓄積リング(JSR)の入射実験なども始められた。実験テーマの変更に伴い、加速ビームの質は一変した。現状の出射ビームは、 $130\sim 150$ MeV $\pm 1\%$ 、パルス幅 $0.5 \mu\text{sec}$ 、尖頭電流 40 mA、パルス繰返し $0.5\sim 1$ ppsである。また最近では、パルス幅 1 nsecのビームも加速している。目標としては、パルス幅 1 nsecで 100 Aの加速を目指したい。

20年間の中でLINACマシン特性実験や試験運転について特徴ある2~3の実験を述べる。

(1) HEM₁₁ (BBU: Beam Blow Up) モード測定実験 (1978年小山田(東北大)他、佐藤(KEK)、浅見(原研)他)
 JAERI-LINACの定常モードでは、パルス幅 $2 \mu\text{sec}$ で尖頭電流 750 mAの加速を行ってもBBUは発生しない。この点に着目した小山田氏は、JAERI-LINAC加速ビーム尖頭電流 720 mA、パルス幅 $2 \mu\text{sec}$ からHEM₁₁モードの周波数5本を検出して測定した。このHEM₁₁モードの解析からBBU対策を提案した。それは長大LINACを建設する場合には、加速管のビームホール2aを換えた定勾配型加速管を多数個配列することによりBBUの発生を抑制できるというものである。この提案はKEK PF 2.5 GeV LINACで実行された。結果は、BBUなしに加速ビーム尖頭電流 320 mA以上の加速に成功している。

(2) KEK PF 2.5 GeV LINAC用De Qing回路の実装試験 (1979年穴見、福田、設楽(KEK))

KEKでは、PF 2.5 GeV LINAC用De Qing回路を設計製作した。この回路をJAERI-LINACクライストロンパルス変調器に実装して動作特性を試験した。この結果、KEKの設計回路が有効に動作し短時間ではPFNの電圧変動率を 1% から 0.05% に抑える事ができた。またDe Qing回路のSCR、キャパシター、負荷抵抗に関する動特性データも収集した。JAERI-LINACの充電用チョークは $25:1$ の2次巻線を有しているが、現在に至るまでDe Qing回路を装置していない。JAERIではその後 300 kVA MG装置を導入して安定化を計った。

(3) 自由電子レーザー(FEL)実験 (1986年~1987年小林仁(東大原施、現KEK)他、河原崎(原研)他)

東大原施では波長 4 cmで10周期の小型ウィグラーを設計製作した。東大原施 35 MeV LINACではより高い波長領域の光を発生させるため、JAERI-LINACで自発放射光の発生実験を原研と共同で行うことになった。JAERI-LINAC TRビーム伝送系(5° 偏向部)に小型ウィグラーと実験装置をセットして実験を行った。ウィグラーに入射したビームは、電子エネルギー 126.7 MeV $\pm 0.85\%$ 、尖頭電流 12 mA、パルス幅 $0.4 \mu\text{sec}$ でビーム径 6×5 mmであった。放射光の分光と写真撮影から 590 nmの自発放射光の発生を確認することができた。この実験以後、JAERIの核物理第2研究室にFELプロジェクトが組織される要因の一つにもなった。

(4) 小型電子蓄積リング(JSR)入射実験(1989年横溝、柳田(原研放射光)他、LINAC OPグループ)

JSRは1989年3月に完成してLINACと接続した。LINACビーム入射運転は、同年4月から開始して7月に最初の蓄積に成功し、以後、電子ビーム入射450時間目に設計上の蓄積電流100 mAを達成した。最大蓄積電流は160 mAに到達し、JSR入射運転中の加速ビームは130~150 MeV±0.5%、尖頭電流30~40 mA、パルス幅~0.5 μsec以下で、ビーム径は伝送系の中間位置で5 mmφであった。

3. LINAC保守整備

LINACの20年の運転期間には数多くの部品交換、修理整備などが行われた。ここでは大型消耗品、真空系、クライストロンパルス変調器、冷却系について述べる。

JAERI-LINACの場合低電力RF系、トリガー系、Q伝磁石、偏向電磁石電源などの電気系については固体素子化の改良を行っており、部品交換や修理などの保守整備に費やされる時間は極めて少ない。

(1) 大型消耗品(クライストロン、サイラトロン)

JAERI-LINACは、Fig.1に示す運転に従って多数の大型消耗品が交換された。JAERI-LINACにセットされている大型消耗品は、クライストロンITT-8568 (RF出力20 MW) 6本、サイラトロンF-175 (50 kV 10,000 A)7本、クライストロンTH-2436 (RF出力10 kW) 1本である。1972年から1992年までに購入した大型消耗品を単純平均した平均寿命はTable-2のとおりである。寿命のクライストロンの大半は管内真空度の上昇により排気不能となったもので、RF窓のピンホール損傷1本、RF窓周辺リーク2本であった。サイラトロンは、安定放電電圧の幅が狭くなったものがほとんどである。JAERI-LINACの場合は、比較的high duty運転が長時間行われた事を考慮すると、通常ではこの実績以上の寿命であったと考えられる。クライストロンITT-8568は、納入後にLINACにセットして、パルス繰返し300 ppsの定常運転ができるまでに60~100分程度であり、サイラトロンF-175についても機器の据え付け、起動開始に特に問題

はない。納入されたクライストロンの内、納入時の受入れ検査で1本だけRF窓に問題があって米国に送り返し修理されている。大型消耗品の維持費に対する支出割合は、運転開始から10年で36.5%、後半10年では約40%を占めている。

Table-2

大型消耗品の平均寿命

大型消耗品名	購入数(本)	寿命数(本)	コントロール時間(1本当たり寿命時間)	ビーム加速時間(1本当たり寿命時間)
クライストロンITT-8568	27	19	12,209.20	9,927.03
サイラトロンF-175(KU-275)	37	27	10,023.60	8,150.00
クライストロンTH-2436(4KP3SN)	5	4	9,665.60	7,858.90

(2) 真空系

LINACの真空系全体に使用されている排気用イオンポンプは21台(160 l/s 1台、80 l/s 9台、40 l/s 3台、10 l/s 8台)で、20年間毎日24時間停止せずに動作してきた。系の真空度は電子銃部付近が 5×10^{-9} TORR以下で、加速管系では 1×10^{-8} TORRである。イオンポンプは、20年間で16台新品と更新している他、電源は11台更新した。イオンポンプ(10 l/sを除く)は6~7年目に1度エレメント及び高圧導入端子を交換したが、一部のイオンポンプケースは、機械的歪のために変形してエレメントや高圧導入端子の脱着ができないものがあったために新品と交換した。この交換は、イオンポンプの寿命に起因したものでなく予防的整備であった。イオンポンプの高圧ケーブルは、放射線被爆による絶縁劣化でコネクタ周辺部の導通ショートが2~3年毎に発生した。電子銃カソードは、運転開始から1年毎に交換したが、電子銃の周辺の真空度を $\sim 10^{-9}$ TORRにしてから2~3年に1度で済ませる事ができた。加速管からターゲットまでの真空導管はすべてアルミニウム化し、これによって残留放射線被爆を1/10~1/20に低減させることができた。またQ電磁石はすべて新規のものに更新された。

(3) クライストロンパルス変調器

LINACがパルス繰返し50~300 ppsまでの運転では、特に大きな問題は起こらなかったが、パルス繰返し600 pps運転の期間には充電用チョーク(50 kV, 4.5 A)3台の絶縁破壊があつて更新した。これは絶縁油の劣化によるものである。パルス成形回路(PFN)のコンデンサー(0.02 μF, 50 kVWV)もパルス繰返し600 ppsで運転中6個の

絶縁破壊があった。このコンデンサーはパルス繰返し300 pps以下では1個も損傷していない。高電圧伝送ケーブルは、端末金具の改良を実施していたため1度も故障は起こらなかった。

(4) 冷却系

LINACの冷却系は、クライストロン冷却系(485,000 kcal/hr, 650 l/min)、加速管冷却系(200,000 kcal/hr, 500 l/min)、ターゲット冷却系(130,000 kcal/hr, 350 l/min)の3系統である。この冷却系は1次系と2次系が熱交換器で仕切られ、1次系は1μS/cm以上の純水を使用している。この冷却系では、特にクライストロン冷却系が問題であった。クライストロン冷却系は熱交換器の細管にピンホール状の電蝕が多数発生して、応力破壊によって細管に割れ目が生じ、1次系に2次系の水が混入するトラブルが発生した。この状態で使用したため、クライストロン3本にピンホール状の電蝕が銀ロー付け部に発生して外部に漏水した。ターゲット系、加速管系では1度も問題が起こっていない。しかし、20年を経過したこれら系統の配管は、1μS/cmの純度の高い水を投入しても3ヶ月も経過しない間に~50μS/cmまで低下しているために、水質管理に多大の労力と費用が必要となっている。将来LINACがShut downに追い込まれるとしたら、これらの装置の改修費用に依存するのではないかと思われる。

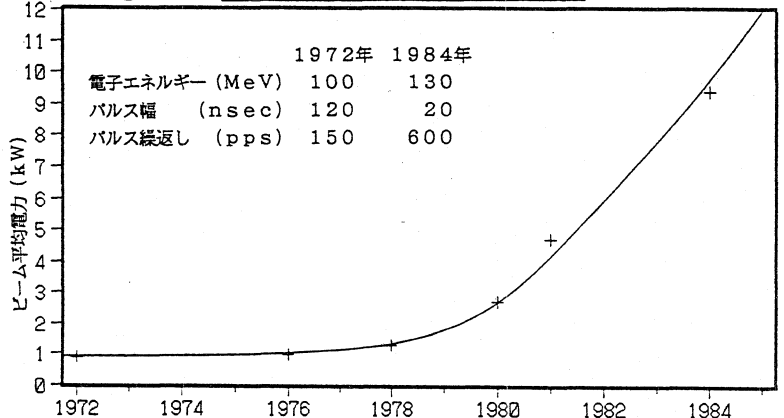
4. LINACの改良と改造

120 MeV JAERI-LINACの経歴年と主な改良と改造をTable-3に示す。LINAC改良と改造の主目的は、中性子核断面積測定に必要な強力パルス中性子源を得るために、パルス幅~10 nsec、尖頭電流~10 Aで高いパルス繰返し(600 pps)とすることである。それと同時に、長時間運転では故障発生がなくメンテナンスフリーとする必要があった。主な改良は電子銃、加速管、パルス変調器の他に電気回路の半導体素子化、信号の光通信化であった。これらの改良と改造を実施した結果、LINACの性能は著しく向上した。Fig.2は経歴年に対する過渡モードの加速ビームの平均出力の推移である。

Table-3 LINAC経歴年と主な改造及び改良

1970~1972	120MeV増力LINAC建設(自家製作)	加速管2m2本, 3m3本 RF20MW 5系統
1972-(8)	120MeV LINAC定常運転	100MeV, ~600mA, 0.5~2μsec, 150pps
1975	RF入力導波管回路真空化	5系統
1976	入射系改造 低電力RF系改造	ガンマ0.7m, RF 10MW 1系統増設 固体素子RF発振器CW 2W プリアンプ4KP3SN(TH2436)
	電子銃周辺回路改造	ガンマトランス, グリッドガンマ更新
	第1加速管更新	4段ステップ近似定勾配型2.2m
	出力加速ビーム	110MeV, 30nsec, 2A, 150pps
1978	第2加速管更新	4段ステップ近似定勾配型2.2m
	出力加速ビーム	120MeV, 30nsec, 2.5A, 150/300pps
1979	マイクロ波窓試作試験	セラミック脱着方式
1980	ガンマ変調器改良	高圧ケーブル端未処理, PFN切替器 サイクロトロン~5μH挿入
1980-(4)	300pps定常運転	120MeV, 30nsec, 2.5A, 300pps
	プリアンプ4KP3SN試作	酸化物含浸型(4KP3SN)
1981-(2)	第3加速管更新	定勾配型3m
	電子銃更新	酸化物含浸型直径25mmφ
-(4)	出力加速ビーム	130MeV, 20nsec, 6A, 300pps
	第4加速管更新	定勾配型3m
1982	第5加速管更新	定勾配型3m
	大型サイクロトロン改造試験	酸化物含浸型直径80mmφ 試運転1000時間以上
1983	ガンマガンマ系固体素子化	ガンマ発生器, 増幅器, デイレイ回路
	インターロック系改修	
1984	ガンマ変調器改修	高圧充電回路一体化, サイクロトロン回路一体化
	サイクロトロンガンマ増幅器	SCR化
-(4)	600pps運転定常化	130MeV, 20nsec, 6A, 600pps
1988	500W固体素子RF増幅器試作	
	LINAC AC電源300kVA MG新設	加速ビーム電流安定化1%以下
1989	小型電子蓄積リング(JSR)新設	130~150MeV±0.5%, 0.3μsec
	JSR入射ビーム	30~40mA, 0.5~1pps
1991	新型第1加速管試作	
	電子銃, グリッドガンマ	ガンマ幅1nsec, ビーム加速

Fig. 2 経歴年に対する過渡モード平均出力



5. LINACレポート、論文などの外部発表

120 MeV LINACが建設されてから今日までJAERI-LINACグループでは、LINACの計画、設計、製作、運転整備、改良、特性測定及び計測実験などについて外部に発表したレポート、論文は61件（外部機関との共著含む）である。その内容の内訳は、LINACステータスレポート14件、LINAC整備、改良レポート23件、LINACの計画、設計製作、特性測定、計測実験23件（外部機関との共著含む）、LINAC建設レポート1件である。発表先は物理学会、原子力学会、加速器科学研究会及びリニアック技術研究会であった。

6. LINACの組織、人員、予算

120 MeV LINACの計画と設計の始まった1970年から今日までの西暦年に対する組織、人員、予算をTable-4に示す。増力LINACは、物理部核物理第2研究室が中性子核断面積測定実験を強力に推進するために実施された。認可された予算は100 MeV級LINACを製造メーカーに発注できる額ではなかったために、全員参加の形で設計製作して建設した。1979年に至り、物理部に加速器管理室が組織され核物理関係の研究室とLINAC運転整備のグループに分かれ、現在では両方の組織を通してLINAC運転整備に関与した人員は、著者1名となった。1972年から開始したLINACの運転整備に、本体建設費の10%が維持費として認められた他、1977年に加速管も消耗品であることを認められて予算化され、その両方の予算によってLINAC運転整備が実施されてきた。

Table-4 年度に対する組織、人員、費用

年度	1970	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	
	(S45)	(46)	(47)	(48)	(49)	(50)	(51)	(52)	(53)	(54)	(55)	(56)	(57)	(58)	(59)	(60)	(61)	(62)	(63)	(H1)	(2)	(3)	(4)	
LINAC増力	→																							
LINAC運転整備		←																						
組織																								
核物理第2研究室	→																							
加速器管理室																								
人員																								
竹腰秀邦																								
浅見 明																								
更田豊治郎																								
田村 務																								
鹿園直基																								
松本純一郎																								
河原崎雄紀																								
桜井 淳																								
大久保牧夫																								
中島 豊																								
水本元治																								
益子勝夫																								
秋山信義																								
信坂幸雄																								
荘司時雄																								
北島正博																								
石崎暢洋																								
田山豪一																								
予算費目																								
LINAC増設費	→																							
LINAC維持費		←																						
加速管																								

7. LINAC雑感

1960年3月、まだLINACが据え付けられていないピカピカのLINAC棟に机を置いて以来、32年6月が過ぎた。その年の6月に20 MeV LINACは数十個の梱包と米人技師一人と共に入荷した。組立建設を担当することになっていた東芝LINAC関係者は、米人技師の一言で追い返されてしまった。理由は“技術が盗まれる”からということであった。その時から、私の未来は今日ある事を予測させた。LINACの組立、整列、配線、試験は全部で10人不足の原研職員がやらされる羽目となった。私は米人技師から“ミッチー”の愛称を頂き、現場作業には必ず腰巾着のようについて廻った。米人技師は六尺豊かで二の腕は私の2倍もあって、彼が穴付きボルトを締め付けてまた分解させられるときはボルトはテコでも動かさず困ったものであった。加速管をアライメントして入口から出口を見ると、満月であるべき月が月食となっている。技師との間で激論となり、彼はトランシットの置き方が悪いと言い張った。2~3日の激論の末ようやく納得して、加速管1 Module (2本) は送り返されることになった。おかげで建設が6ヶ月以上もかかったが、年の瀬の12月25日ようやく20~30 mAの加速ビームを引き出してバンザイとなった。彼はそれを見てさっさと帰ってしまい、年明け後の運転は我々だけでやらされるはめとなってしまった。

ちなみにその当時と現在のLINACの性能の大まかな比較をしてみると

	32年前の20 MeV新鋭LINAC	現用LINAC	30年後のLINAC
LINAC出力	20 MeV, 0.2 A (6 m)	120 MeV, 0.6 A (13m)	1 GeV, 0.2 A (20 m) ?
加速管			
モード	$\pi/2$	$2\pi/3$	
シャuntインピーダンス	33 M Ω /m	54 M Ω /m(65 M Ω /m)	
長さ	1 m(電鍍法)	3 m(凹付法)	
1 m当たりのRF POWER	1 MW	20 MW(30 MW)	
1 m当たりの加速電場	$E_0=4$ MV/m	$E_0=15\sim 20$ MV/m	
位相精度	$\pm 10^\circ$	$\pm 1.5^\circ$?
周波数安定度	$f_0 \pm 500$ kHz ($85^\circ\text{C} \pm 1.5^\circ\text{C}$)	$f_0 \pm 3$ kHz以下 (常温)	
管内真空度	$>5 \times 10^{-6}$ Torr (油拡散ポンプ)	$<1 \times 10^{-8}$ Torr (イオンポンプ)	
BBU現象	>180 mA	>750 mA(なし)	
電子銃			
カート	1 mm ϕ Ta渦巻状 グリッドなし、直熱型	酸化物含浸型 グリッド付き、傍熱型	

このLINACの比較表からみると、現在はLINACグルメの時代だと痛感する。この違いのために32年を棒にふる気がする。でも、I have been much interested in the LINAC technology !であった。

おわりに

東北大核理研、東大原研、KEK、電総研、核研、日大理工、阪大産研、北大、京大原子炉実験所(順不同)のLINAC関係者に対し、今日までのご指導とご協力を感謝致します。

参考文献

1. JAERI 6014 Report LINACの建設と運転(1964年) 平川活正 他
2. JAERI 1238 Report LINACの設計、製作と運転(1975年) 竹腰秀邦 他
3. Proceedings of the 4th and 5th Symposium on Accelerator Science and Technology (1982年,1984年)
4. Proceedings of the 1st to 16th Linear Accelerator Meeting in Japan (1975年~1991年)