

# 세계의 加速器 開發現況

— 加速器의 現況과 開發計劃 —

가속기 기술은 의료 및 산업 발전에 필요한 도구로서 또 원자, 원자핵, 소립자 등 금세기의 기초과학 연구수단으로서 빼놓을 수 없는 것으로 탄생해 급속히 발전하고 있다. 이같이 큰 가능성을 보이고 있으며 앞으로 그 중요성이 점차 커질 것으로 예상되는 가속기의 장래를 전망해보기로 한다.

## 머리말

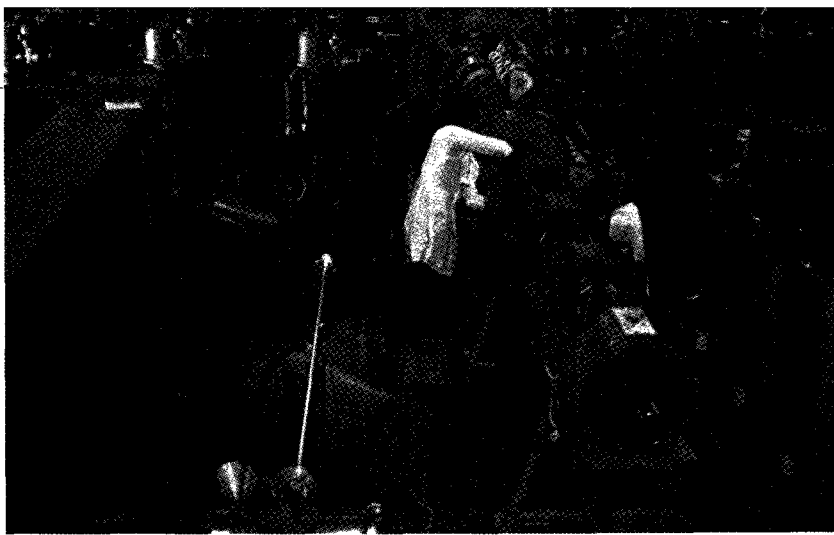
고에너지 가속기는 한때 「 $\pi$  중간자를 만들어 낼 수 있는 가속기」라고 했던 시대도 있었으나 최근에는 빔·에너지가 약 1GeV 이상의 것을 말하는 것 같다. 여기서는 현재 세계에서 가동중인 고에너지 가속기와 현재 건설중이거나 가까운 장래에 건설예정인 가속기 계획을 표기해〈표 1~6〉고에너지 가속기와 이와 관련된 기술개발 동향을 개관하기로 한다.

## 소립자연구용 가속기

소립자연구용 장치〈표1~4〉는 1970년대에 들어서면서 점차 빔 충돌형 가속기가 주류가 되었다. 특히 電子 가속기에서는 固定標의型 실험이 소규모의 것을 제외하고는 거의 없어졌다. 이것은 고정표적형에 비해 가속입자끼리 부딪히게 하는 쪽이 훨씬 큰 반응의 에너지를 실현시킬 수 있기 때문인데 1970년대 전반에

활약한 CERN의 ISR라고 불리우는 陽子-陽子 충돌형 가속기와 SLAC의 SPEAR라고 불리우는 電子-陽電子 충돌형 가속기에서 beam 저장기술과 beam-beam 상호작용에 관한 연구가 비약적으로 진척된 것도 큰 요인이 되었다고 볼 수 있다. 또 “반데르메르”가 발명한 beam의 확률냉각의 원리가 실용화되어 反陽子 beam의 저장이 가능해진 것이 가속기의 超高 에너지화를 촉진시켰다. 기존의 가속기에서 도달할 수 있는 반응에너지는 약 100GeV (10<sup>18</sup>cm)이지만 지금은 이 범위내의 거의 모든 소립자현상은 표준이론이라는 것으로 설명할 수 있다.

그러나 한편으로는 이 이론의 근간을 이루고 있는 “힉스” 메커니즘이 밝혀지지 않고 있다. 단가, 소립자의 질량을 예언할 능력이 없다는 등, 이론의 부자연성이 지적되고 있어 이 이론을 더 높은 차원에서 실험적으로 검증하는 것이 소립자물리학의 가장 중요한 연구과제가 되어 있다. 이 연구를 위한 가속기로는 에너지 및



〈표 1〉 양자 Synchrotron

가속기所在研究機關	가속기略稱	에너지 [GeV]	빔強度 [粒子數/秒]	直徑 [m]	建設完成年	備考
페르미研究所(미국)	—	150	$2 \times 10^{12}$	2,000	1972	Tevatron으로의 入射
	Tevatron	800	$\sim 10^{13}$ /分	2,000	1983	
CERN(스위스)	CPS	28	$1 \times 10^{13}$	200	1959	
	SPS	450	$3 \times 10^{12}$	2,200	1976	
세르프코프 에너지연구소(소련)	—	76	$2 \times 10^{12}$	472	1967	
	UNK	3,000	?	6,612	建設中	
브룩헤븐 國立研究所(미국)	AGS	33	$1.3 \times 10^{13}$	256.9	1960	
고에너지物理學研究所(日本)	KEK-PS	12	$2 \times 10^{12}$	108	1976	
理論·實驗研究所(소련)	U-10	10	$7 \times 10^{11}$	80	1961	
로렌스·버클레이 研究所(미국)	Bevalac	p 4.9 $\alpha$ 8.4	$8 \times 10^{11}$ $8 \times 10^9$	40	1954 1974	入射器改造後 U까지 加速
사클레이 研究所(프랑스)	Saturne	p 3 $\alpha$ 2.3	$6 \times 10^{11}$ $2 \times 10^{11}$	33.6	1958 1978	改造後 Kr까지 加速
독일電子Synchrotron研究所(독일)	DESY III	7.5	$2.8 \times 10^{11}$	100.8	1989	PETRA II 로의 入射
	PETRA II	40	$7 \times 10^{12}$ /5分	733.4	1989	HERA 로의 入射

〈표 2〉 전자 Synchrotron

가속기所在研究機關	가속기略稱	에너지 [GeV]	빔強度 [粒子數/秒]	直徑 [m]	建設完成年	備考
코넬大學(미국)	—	4.5-6	$2 \times 10^{12}$	240	1967	CESR 로의 入射
독일 전자Synchrotron 研究所(독일)	DESY II	7	$2.5 \times 10^{10}$	100.84	1964	PETRA II 로의 入射
	PETRA II	14	$2 \times 10^{11}$ /5分	733.4	1978	HERA 로의 入射
에레반物理學研究所(소련)	ARUS	6	$5 \times 10^{12}$	68.98	1967	
본 大學物理學研究所(독일)	—	2.5	$4 \times 10^{12}$	22.15	1967	
	ELSA	2-3.5	?	52.3	1988	
東京大學原子核研究所(日本)	INS-ES	1.3	$2 \times 10^{12}$	11.06	1961	
뚝스크 科學技術大學核物理研究所(소련)	Syrius	1.3	$5 \times 10^{11}$	10.47	1965	
	AR*	8	$2 \times 10^{11}$ /0.5分	120	1983	TRISTAN으로의 入射 및 放射光利用
고에너지物理學研究所(日本)						

(\* 방사광원용 저장 ring으로도 이용되고 있는 가속기)

beam강도에서 종전의 것을 훨씬 웃도는 장치가 요구되는데 표1~4의 SSC계획, LHC계획, B-Factory 계획 등이 이에 해당한다. 전자의 2가지는 양자-양자 충돌형으로 현재의 최대 에너지를 약 10배로 하는 것을 목표로 하고 있다. 한편 B-Factory는 전자-양전자 충돌형으로 에너지는 낮지만 beam 강도를 아주 크게 해 B-중간자에 관한 초정밀실험을 통해 표준이론을 공박하려는 것이다. 원래는 여기에 전자-양전자형으로 에너지 frontier를 겨냥한 가속기를 추가하지 않으면 안되지만 유감스럽게도 기술적으로 이것을 바로 실험시킬 수 있는 단계까지는 이르지 못하고 있다. TRISTAN이나 LEP 같은 원형 가속기는 방사광에 의한 에너지 방출이 너무 커져(beam 에너지의 4승에 비례한다), TeV에 이르는 장치는 ring의 크기와 필요한 고주파전력이 거의 비현실적인 규모가 된다.

그래서 지금은 전자와 양전자를 lineac에서 직선적으로 가속해 충돌시키는 장치인 linear collider의 개발이 정책적으로 추진되고 있다. 원리 자체는 극히 간단하지만 光度를 실현시킬 수 있을 것인지 등 아직도 해결해야 할 문제가 많이 남아있다.

한편 원자핵 연구에서는 매우 특이한 성과가 기대되는 것으로 超傳導 lineac에 의해 4GeV의 연속전자 beam을 가속하는 CEBAF 계획 <표 3>과 高에너지로 가속한 重이온을 서로 부딪치게 해 초고온, 고밀도에서의 원자핵 반응

을 연구하는 Brookhaven연구소의 RHIC 계획이 있다.

최근 가속기 개발분야에서 현저한 진전을 보이고 있는 것은 초전도기술의 응용분야다. 초전도 전자석과 초전도 가속空洞이 중심이 되어 전자에 대해서는 Fermi 연구소의 Tevatron이, 후자에 대해서는 高에너지연구소의 TRISTAN이 대규모 실용화를 시작했다. 최근 화제가 되고 있는 고온 초전도재료의 응용에 대해서도 연구가 이뤄지지 않고 있는 것은 아니지만 현실적에서는 가까운 장래에 가속기에서 실용화될 가능성은 매우 희박하다.

### 大電流陽子加速器

이 분야의 장치는 세계적으로 극히 한정되어 있어 최근에는 Rutherford 연구소에 건설된 中性子線 回折전용 가속기 ISIS가 눈에 띈 정도다. 일본에는 엄밀하게 말해 이 부류에 속하는 가속기는 없다. <표5>에는 일단 高에너지 물리연구소의 booster synchrotron을 넣었지만 중성자선 回折, muon beam을 사용하는 실험, 양자선의 의학이용 등, 용도상으로 비슷하다는 것 뿐이고 대전류의 전용가속기는 아닌 것이다.

이들 booster 이용시설을 발전시킨 것으로 본격적인 대강도 양자가속기를 만들려고 하고 있는 것이 도쿄대학 원자핵연구소를 중심으로 한 대형 hadron 계획이다. 현재는 예비조사의

<표 3> 전자 Lineac

加速器所在研究機關	加速器略稱	에너지 [GeV]	빔 強度 [粒子數 / 秒]	全長 [m]	建設 完成年	備 考
스텐포드 線形加速器센터(미국)	—	56	$2 \times 10^{14}$	3,050	1966	SPEAR, PEP, SLC로의 入射
高에너지 物理學研究所(日本)	—	2.5	$1.5 \times 10^{13}$	320	1981	PF 및 AR로의 入射
오르세 線形加速器研究所(프랑스)	—	2.3	$1 \times 10^{14}$	230	1959	Super ACO, DCI로의 入射
하르코프 理工學研究所(소련)	—	2.0	$5 \times 10^{12}$	240	1964	
北京 高에너지 物理學研究所(中國)	—	1.5	$2 \times 10^{11}$	202	1984	BEPC로의 入射
CEBAF(미국)	—	4	$1.2 \times 10^{15}$	160	建設中	超傳道 lineac

〈표 4〉 Beam 충돌형 가속기

가속기所在研究機關	가속기略稱	粒 子	에너지 [GeV]	平均直徑 [m]	建設 完成年	備 考
페르미研究所(미국)	Tevatron	$\bar{p}, p^-$	900	2,000	1985	
CERN(스위스)	SppS	$\bar{p}, p$	315	2,200	1981	
	LEP	$e^+, e^-$	50	8,486	1989	
	LHC	$p, p$	8,000	8,486	計劃中	
고에너지物理學研究所(日本)	TRISTAN	$e^+, e^-$	32	960	1986	
	TRISTAN III-B	$e^+, e^-$	$e^{+3.5}, e^{-8.0}$	960	計劃中	B · Factory
스텐포드線形가속기센터(미국)	PEP	$e^+, e^-$	16	700	1980	
	PEP-B	$e^+, e^-$	$e^{+3.1}, e^{-9.0}$	700	計劃中	B · Factory
	SLC	$e^+, e^-$	50	600	1987	Linear Collider
독일 電子Synchrotron研究所(독일)	DORIS-II*	$e^+, e^-$	5.3	91.7	1973	
	HERA	$e^-, p$	$e^{-30}, p800$	2,017	1990	
코넬大學(미국)	CESR*	$e^+, e^-$	6	240	1979	
	CESR-B	$e^+, e^-$	$e^{+3.5}, e^{-8.0}$	240	計劃中	B · Factory
노보시비르스크 核物理研究所(소련)	VEPP-4M*	$e^+, e^-$	6	116.6	1990	
北京 高에너지物理學研究所(中國)	BEPC*	$e^+, e^-$	2.8	76.5	1988	
프라스카티 國立研究所(이탈리아)	ADONE*	$e^+, e^-$	1.5	33.42	1969	
	—	$e^+, e^-$	0.51		建設中	$\phi$ Factory
SSC研究所(미국)	SSC	$p, p$	20,000	27,616	建設中	
브룩해븐 國立研究所(미국)	RHIC	重ion	100 / AMU	1,220	建設中	
세르프코프 高에너지研究所(소련)	UNK	$p, p$	3,000	6,612	建設中	

\* 방사광원용 저장 ring으로도 사용되고 있는 가속기)

〈표 5〉 大強度陽子가속기(중간자, 중성자 Factory 등)

가속기所在研究機關 略稱(國名)	가속기略稱	가속기種類規模	에너지 [MeV]	陽子 빔 強度 [粒子數/秒]	建設 完成年
로스알라모스 科學研究所(미국)	LAMPF	陽子線形가속기 全長 785m	800	$4 \times 10^{15}$	1972
트라이엠프 메이슨 Factory(캐나다)	TRIUMF	陽子 cyclotron 磁極徑 34.34m	520	$6 \times 10^{14}$	1974
	KAON	陽子 synchrotron 平均直徑 342m	30,000	$6 \times 10^{14}$	計劃中
폴 · 쉘러研究所(스위스)	PSI	陽子 ring cyclotron 磁極徑 9.2m	595	$6 \times 10^{14}$	1974
科學아카데미原子核研究所(소련)	—	陽子線形가속기 全長 450m	602	?	?
러더포드研究所(영국)	ISIS	陽子 synchrotron 平均直徑 52m	800	$1.2 \times 10^{15}$	1984
고에너지 物理學研究所(日本)	BSF	陽子 synchrotron 平均直徑 12m	500	$4 \times 10^{13}$	1976
東京大學原子核研究所(日本)	JHP	陽子線形가속기 全長 500m	1,000	$2.5 \times 10^{15}$	計劃中

예산이 인정되어 대강도 양자lineac 개발 등이 정력적으로 진행되고 있는 단계지만 아직 본격적인 건설의 구체적인 스케줄은 정해지지 않았다. 한편 TRIUMF 연구소에서 제안하고 있는 KAON 계획은 30 GeV의 대강도 양자 synchrotron에 의한 K·중간자 factory를 겨냥한 것이지만 건설에 대해서는 캐나다정부의 결론을 기다리고 있는 상황이다.

또 최근 이 종류의 대강도 가속기가 원자핵

변환반응에 의한 원자로 핵연료 처리에의 응용을 둘러싸고 주목을 받고 있다.

### 방사광 연구용 가속기

<표 6>은 방사광 연구를 위한 전용 가속기를 표기한 것인데 그 수와 다양성만 보아도 근년에 이 분야의 눈부신 등장을 엿볼 수 있다. 역사적 배경도 있어 일본은 이 분야에서는 명실

<표 6> Synchrotron 방사광원 전용 전자 또는 양전자 저장 Ring

國名	加速器所在研究機關	加速器名稱	빔 에너지 [GeV]	電流 (目標值) [mA]	光子 에너지 [keV]*	完成年
日本	東京大學 物性研究所	INS-SOR II	0.4	450	0.13	1975
	高에너지物理學研究所	Photon Factory	2.5	500	4.00	1982
		TRISTAN III-SR	10	(100)	18.0	計畫中
	分子科學研究所	UV-SOR	0.6	500	0.22	1984
	電子技術總合研究所	TERAS	0.66	100	0.32	1981
	소르텍	SORTEC	1.0	200	1.60	1989
	理化學研究所-原子力研究所	SPring-8	8	(100)	25.8	建設中
	九州大學	---	1.5	(500)	1.80	計劃中
	廣島大學	HiSOR	1.5	(350)	1.81	計劃中
	大阪科學技術센터	---	2	(200)	3.17	計劃中
	東京大學物性研究所	---	1.5	(400)	1.51	計劃中
東北大學	---	1.5	(400)	1.87	計劃中	
미국	위스콘신大學	ALADDIN	1.0	320	1.07	1981
	스텐포드 線形加速器센터	SPEAR	3.7	200	11.2	1974
	브룩헤븐 國立研究所	NSLS-UV	0.7	500	0.40	1981
		NSLS-X	2.5	250	4.24	1984
	로렌스버클리研究所	ALS	1.9	(400)	3.11	建設中
독일	Argonne 國立研究所	APS	7	(100)	19.4	建設中
	베를린 放射光電子 ring 研究所	DBESSY	0.8	500	0.62	1982
영국	다레스베리 研究所	SRS	2.0	350	3.20	1980
	프랑스	오르세 線形加速器研究所	Super ACO	0.8	150	0.32
		DCI	1.8	300	3.39	1976
유럽 放射光研究施設		ESRF	6	(100)	19.0	建設中
이탈리아	트리에스테 放射光研究所	ELETTRA	2	(400)	3.20	建設中
	소련	모스크바大學	PAKHRA	1.3	300	1.22
노브시리르스크 核物理研究所		VEPP-3	2	250	4.11	1977
쿠루차토프 原子力研究所		Siberia-2	2.5	(300)	7.01	建設中
中國	科學技術大學 放射光研究所	HESYRL	0.8	(300)	0.51	1989
	韓國	보스텍	PLS	2	(100)	2.79
臺灣		放射光研究센터	SRRC	1.3	(200)	1.38

(완성연도는 방사광원 완성시기, \* ring 편향자장에 의한 임계에너지)



공히 세계에서 선도하고 있는 입장에 있다(일본의 방사광 연구는 1960년대 초에 도쿄대학 원자핵연구소의 1.3GeV 전자 Synchrotron을 사용하면서 시작되었다).

그러나 멀지 않아 유럽과 미국에 주도권을 빼앗길 것 같다. 왜냐 하면 ESRF, ELETTRA, APS, ALS 등 제3세대라고 불리는 가속기(挿入光源을 중심으로 한 低 emittance Lattice의 ring)가 차례로 출현하기 때문이다. 일본에서도 이들에 필적하는 SPring-8 계획이 있는데 그 조기완성이 크게 기대되고 있다.

방사광을 위한 가속기에 대해서도 여러가지 기술개발이 이뤄지고 있지만 주요한 것은 대전류와 低 emittance의 요구에 대한 것과 점점 長尺化되고 있는 삽입광원에 관한 것이다. 전자는 소립자연구를 위한 가속기에도 공통되는 문제로 beam 불안정성과 관련해 현재는 고에너지 물리학연구소의 PFring 등, 매우 국한되어 있지만 전자 대신에 양전자를 저장하는 ring이 앞으로 더욱 증가할 것으로 보인다.

## 결 언

지금까지 현재의 고에너지 가속기와 가까운

장래를 겨냥한 가속기 개발현황을 살펴 보았다. 그러나 얼핏 보아 알 수 있는 것은 모두 원리적으로는 훨씬 이전에 확립된 것 뿐이고 매우 혁신적인 요소라고 할 수 없는 것 같다.

이 중에서 고에너지 가속기와의 직접적인 관계는 별도로 하고 최근에 주목을 받고 있는 것은 自由電子 레이저의 연구와 플라즈마를 이용한 입자가속 연구다. 자유전자 레이저에 대해서는 lineac를 사용하는 것과 전자저장 ring을 사용하는 것이 있고, 파장에 대해서도 마이크로波 영역서부터 可視光 영역까지 여러가지다. 모두 초강력한 干涉性的의 전자파를 만들려고 하는 것으로 여러가지 응용을 생각할 수 있어 새로운 장치의 제작이 세계 각지에서 이뤄지고 있다. 플라즈마를 이용한 가속기를 지금까지도 몇번 화제가 된 일이 있지만 최근 플라즈마속에 레이저나 전자 beam을 넣어 강력한 加速電界를 만드는 실험이 이뤄지고 있다. 이론적으로 가능시되는 1GeV/m의 수준까지는 이르지 못했지만 이론적으로 분석할 수 있는 수준의 데이터를 얻을 수 있어 앞으로의 발전이 기대된다.