

SPring-8

—日本 大型放射光施設計劃—

방사광

금세기 후반에 들어서면서 빛이 과학기술의 넓은 분야에서 이용하게 되어 새로운 「빛의 시대」가 도래했다. 그 주역은 레이저(laser)지만 방사광도 그 일익을 담당하고 있다. 특히 파장이 짧은 영역에서는 방사광 외에 강력한 광원이 없어 방사광이 주역의 자리를 지키고 있다.

20세기 초에 量子물리학을 탄생시킨 계기가 된 分光學은 잠시 침체했다가 다시 부활했다. 왜냐 하면 레이저나, 방사광 같은 우수한 光源이 출현했기 때문이다. 여기서 말하는 우수한 광원이란 輝도가 높고 spectrum(파장분포) 특성이나 指向성이 좋은 빛을 내는 광원을 말한다. 레이저는 coherent한 단일파장의 빛을 내는 이상적인 광원이지만 현재는 아직 赤外線에서 可視光, 眞空紫外線에 이르는 파장 범위의 빛밖에 발광하지 못한다.

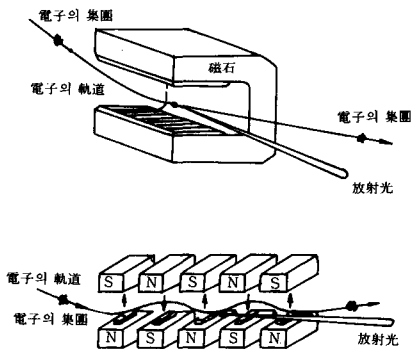
한편 방사광은 高에너지 전자가 자장 중에서 꺾어질 때에 그 진행방향에 방사하는 指向성이 좋은 전자파(보통 이것도 빛이라고 부른다)로<그림 1>, 매우 넓은 범위에 걸친 연속 spectrum을 갖고 偏光하고 있다. 전자는 일반적으로 pulse적으로 가속되기 때문에 高에너지 전자에서 나오는 방사광은 극히 짧은 시간의 pulse광이다.

X-선 영역에 한해서 보면 방사광원은 일반적으로 사용되고 있는 X-選管보다도 100만배 이상이나 높은 輝도를 갖고 있다. 또한 이 휘도를 더욱 높이는 연구가 이루어지고 있다. 가까

운 장래에 X-선관보다 1兆배나 휘도가 높은 방사광원이 실현될 것으로 보인다<그림 2>. 여기서 말하는 휘도는 어떤 파장의 X에서 광원의 단위면적에서 단위立體角의 범위에 1초간에 방출되는 파장폭 0.1% 중에 포함되는 光子數를 말한다.

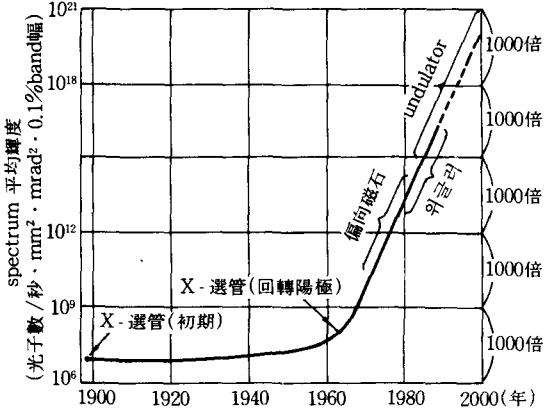
그런데 왜 보다 높은 휘도의 광원이 요구되는 것일까. 그 주된 이유는 과학기술의 발전과 함께 다음 사항이 요구되기 때문이다.

- (1) 微小試料, 希薄試料, 微量成分의 測定
- (2) 파장, 운동량, 시간, 위치, 성분원소 등의 高分解能 측정
- (3) 현상의 단시간 측정, 時系列에 따른 측정
- (4) 상호작용이 작은 현상, 반응확률이 작은 현상의 측정
- (5) 局所構造의 해석, 성분원소별 해석 등



<그림 1> 방사광의 발생. 위는 偏向磁石, 아래는 挿入光源으로부터의 방사광을 나타냄.

X-線強度의 增加



<그림 2> X-선광원 휘도의 향상

일례를 들어 기능성 재료와 生物재료는 측정 가능한 시료가 작으면 작을수록 다양한 시료를 試作해서 분석·해석하는 것이 가능해져 신재료 개발이나 蛋白工學 등의 발전이 가속될 것이다.

SPring-8은 이같은 요망에 응할 수 있는 고성능의 高輝度 X-선 방사광원이다.

제3세대의 방사광원

최근 방사광의 유용성이 널리 인식되어 방사광 전용의 電子가속기가 많이 건설되어 가동되고 있다. 이것들은 초기의 高에너지 물리학 실험용 가속기인 parasite(寄生的) 이용시설과는 달리 방사광 이용에 적합하도록 건설되어 운영되고 있다. 그래서 이것들을 제2세대의 방사광원이라 부르고 있다.

한편 SPring-8과 같은 高輝度 방사광원은 제3세대 방사광원이라고 불리고 있다. 그 특징은 광원인 전자속기가 低emittance 蓄積 ring 이어서 삽입장치가 주요한 방사광 발생원이 되어 있어 광원의 휘도가 제2세대의 그것보다 3자리나 4자리가 더 높게 되어 있다는 것이다.

축적ring은 그 속을 돌고 있는 粒子(방사광원의 경우는 전자 또는 陽전자)數를 늘리기 위해 계속 入射해서 축적하도록 하는 “가속기”

다. 입자가 돌고 있는 眞空chamber의 진공도가 좋으면 축적된 입자는 몇십 시간 이상 계속 돌 수가 있다. 전자축적ring의 경우는 전자가 방사광을 내고 에너지를 상실하기 때문에 항상 가속할 필요가 있다. SPring-8에서는 전자가 1周했을 때 상실하는 에너지는 약 9.23MeV로 508.6MHz의 고주파에서 그 분량만큼 가속하고 있다.

1개의 전자가 내는 방사광의 각도 폭은 $1/\gamma$ ($\gamma=E/m_0c^2$, E는 전자에너지, m_0c^2 은 전자의 靜止에너지로 0.51MeV) 정도다. 그런데 가속기에서는 많은 전자가 집단을 이루어 가속되고 있기 때문에 (beam), 방사광 확산은 beam의 크기와 확산각도와도 관계가 있다. 그래서 축적ring의 전자beam을 되도록 가늘고 평행으로 하면 (低emittance화), 방사광의 각도 폭이 줄어 광원의 휘도를 높일 수가 있다. 제3세대의 방사광원은 제2세대에 비해 emittance가 2자리 작은 低emittance ring이다.

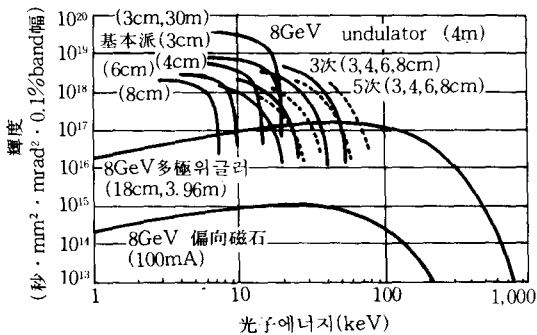
일정한 자장(偏向磁石의 경우)에서는 전자는 圓弧형 궤도에 따라 진행하지만 자장의 크기가 正弦곡선형으로 분포하면 전자도 正弦곡선형으로 蛇行운동하여 진행방향으로 빛을 낸다(그림 1). 이것이 挿入광원이다. 자장이 비교적 강하고 사행운동의 진폭이 크면 빛의 강도는 각 사행운동에서 나오는 빛의 총화(N번 사행하면 N배)가 된다. 이것을 “위글러”라고 한다. 한편 자장이 약하면 사행운동중에 나오는 빛은 서로 간섭해 간섭조건에 맞는 파장영역의 빛만 얻을 수 있어 N^2 배의 강도가 된다. 이것이 undulator다. 삽입광원을 사용하면 빛의 휘도가 훨씬 높아진다.

현재 유럽(ESRF, European Synchrotron Radiation Facility)과 미국(APS, Advanced Photon Source) 및 일본(SPring-8)에서 高輝度 X-선 방사광원이 건설되고 있다. 이것들은 모두 에너지가 6~8GeV되는 삽입광원을 설치할 수 있는 둘레 길이가 긴(~6m) 직선부를 많이 갖고 있는 둘레길이가 긴(低emittance 축적 ring)이다. 앞의 3개 시설을 비교해 보면 <표 1>과 같다. 에너지, 둘레 길이, 삽입광원의

〈표 1〉 세계의 高輝度X-線放射光源

	ESRF	APS	SPring-8
에너지 (GeV)	6	7	8
蓄積電流 (mA)	100	100	100
周長(m)	844	1,104	1,436
cell數	32	40	48
偏向磁石(T)	0.8	0.6	0.67
偏向半徑 (m)	25	39	40
加速高周波 (MHz)	352	352	508
特性光子 에너지 (keV)	19.2	19.6	28.3
emittance (nmrad)	6.8	8.0	6.9
挿入光源用直線部數	29	34	36(4*)
beam의 大** (mm×mm)			
undulator	0.4×0.08	0.3×0.09	0.4×0.08
위글러	0.07×0.05	0.3×0.09	0.09×0.06
beam의 확산** (mrad)			
undulator	0.01×0.007	0.03×0.009	0.02×0.008
위글러	0.09×0.13	0.03×0.009	0.08×0.01

注) * 長直線部(30m)의 數
 ** (水平)×(垂直)



〈그림 3〉 SPring-8의 휘도 spectrum

수 등에서 가장 선진적인 계획이 SPring-8이다.

SPring-8의 건설장소는 효고(兵庫)현의 하리마(播磨)과학공원도시로 현재 부지조성공사가 진행중이다. 또 시설의 완성과 사용개시는 현재로는 1998년으로 예정되어 있다. 또한 시설의 명칭과 symbol mark도 공모되어 SPring-8(Super Photon ring-8GeV)과 도안이 선정됐다.

SPring-8의 구성

SPring-8은 8GeV의 陽전자(당초는 전자)를 사용하는 방사광원으로 그 휘도spectrum을

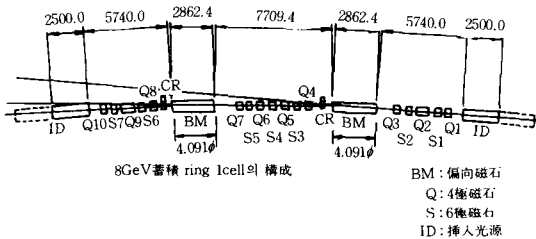
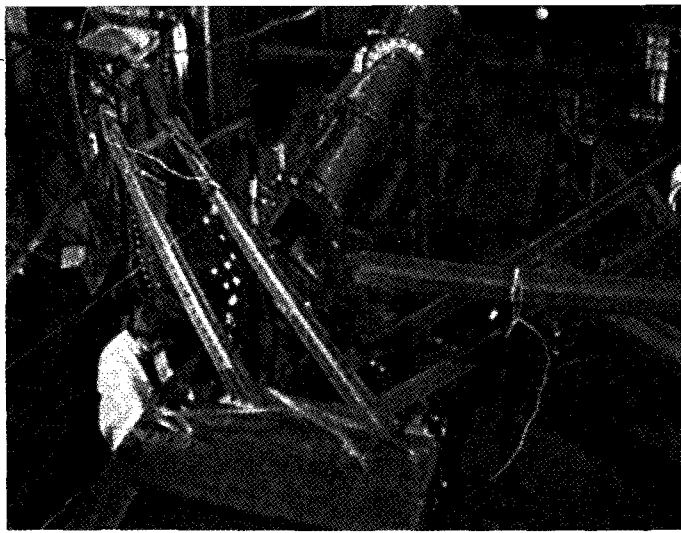
〈그림 4〉에 나타냈다. 偏向磁石과 “위글러”는 그림에 나타낸 것과 같은 spectrum의 빛을 내지만 undulator는 좁은 범위의 빛 밖에 내지 않는다. 그림에 undulator로 표시한 선은 spectrum이 아니고 자장의 강도를 변화시켰을 때의 파장범위를 나타내고 있다.

SPring-8의 가속기 시스템은 양전자 발생과 前段 가속을 위한 전자 lineac, 前段 가속을 위한 전자 synchrotron과 광원용 축적ring으로 구성되어 있다.

축적ring은 低emittance로 〈그림 4〉에 나타낸 “채스만·그린”형의 자석배치를 단위 cell로 해 48cell로 구성되어 있다. 단위 cell은 偏向磁石(BM) 2대 외에 4極磁石(Q) 10대, 6극자석(S) 7대와 미조정용 자석(CV, CH)으로 구성되어 있다. 양단에 삼입광원(ID)을 위한 직선부가 있고 실질적으로 4m의 ID를 설치할 수 있다. emittance는 6.9nmrad으로 충분히 작다.

이 ring의 다른 것에 없는 특징은 길이 36m의 긴 직선부(직선 cell)를 4개소 갖고 있다는 것이다. 긴 직선부에는 30m 정도의 긴 undulator를 설치할 수 있어 매우 높은 휘도를 얻을 수가 있다.

〈표 1〉에서 알 수 있듯이 축적ring은 둘레



〈그림 4〉 SPring-8의 자석배열 (단위 : cell)

길이 1,436m로 44개의 단위cell, 4개의 직선cell로 구성된다. 직선cell에 인접한 직선부는 직선 cell의 일부가 되기 때문에 직선부의 수는 보통 것(6.5m)이 40개소, 긴 직선부(36m)가 4개소 된다. 이 중 보통 직선부는 入射에 1개소, 고주파가속에 1개소가 사용되기 때문에 삼입광원으로 이용할 수 있는 직선부의 수는 보통 직선부가 34개, 긴 직선부가 4개가 된다.

偏向磁場の 강도는 0.67T로 편향자석으로부터의 입사광의 특성 에너지는 28.3keV가 된다. 가속고주파의 주파수는 高에너지 물리학연구소의 TRISTAN과 같은 508.6MHz를 채용했다.

축적ring에는 8GeV의 양전자를 입사하기 때문에 입사용 가속기가 필요하다. 그 개요를 〈표 2〉에 표시했다. 전자lineac는 250MeV의 양전자발생용 lineac과 양전자를 1GeV까지 더 가속하는 主lineac로 구성돼 있다. 모두 2,856MHz의 고주파로 가속되고 반복은 60Hz다. peak전류치는 전자에서 300mA, 양전자에서 10mA를 목표로 하고 있어 양전자발생용 lineac의 peak전류가 10A로 되도록 할 생각이다.

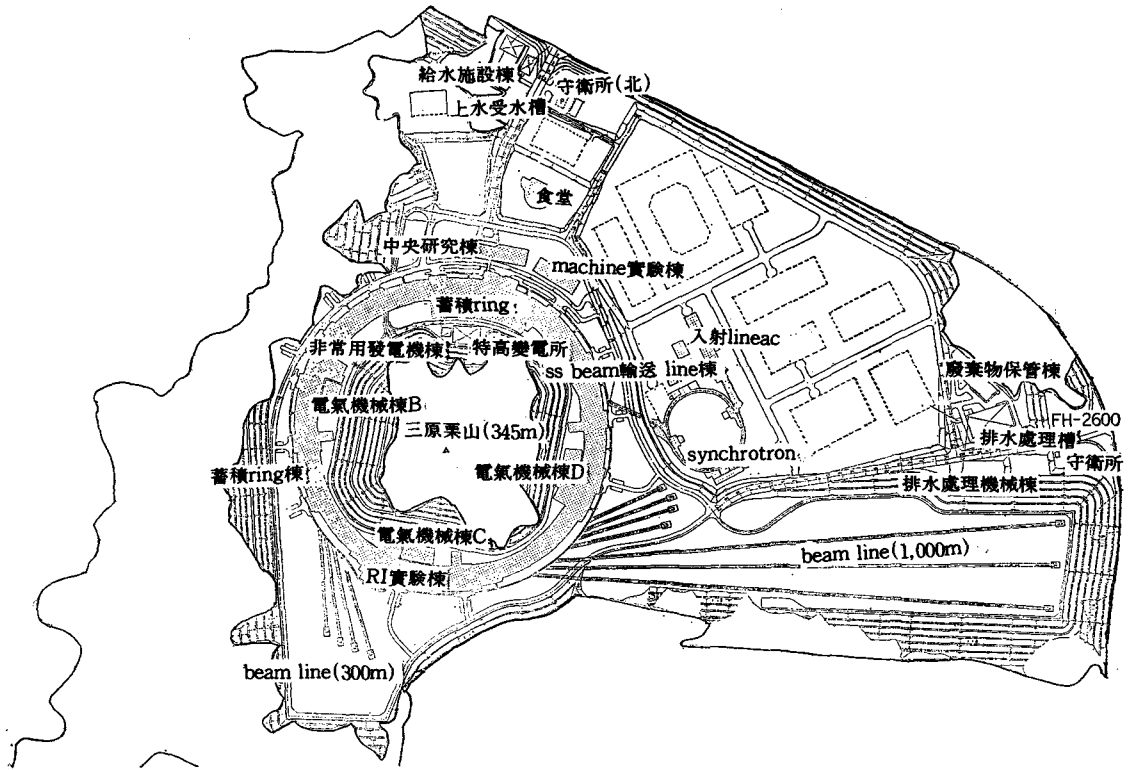
〈표 2〉 입사기의 주요 parameter

Lineac		
PF 周波數	2,856	(MHz)
크라이스론 出力	35	(MW)
反復數	60	(Hz)
主 Lineac		
最終에너지	1	(GeV)
peak電流 (e ⁻ /e ⁺)	300/10	(mA)
陽電子lineac		
電子에너지	250	(MeV)
peak電流 (e ⁻ /e ⁺)	10/10	(A/mA)
陽電子에너지	120	(MeV)
Synchrotron		
入射에너지	1	(GeV)
最大에너지	8	(GeV)
周長	396	(m)
cell數	40	
反復數	1	(Hz)
tune (V _x , V _y)	11.73/8.78	
emittance	192	(nmrad)
偏向磁石磁場(1GeV/8GeV)	0.106/0.85	(T)
RF 高周波數	508.6	(MHz)

synchrotron은 반복이 0.5~0.75Hz이고 가속주파수는 축적ring과 같은 508.6MHz다. FODO형의 자석배치는 入射點과 引出을 위해 직선부가 2개소 있는 race track형으로 되어 있고 둘레 길이는 396m이다.

전자lineac의 에너지는 앞으로 소형 ring의 入射器를 다른 연구에도 사용할 수 있도록 1GeV로 했다.

〈그림 5〉에 대형 방사광시설 부지에서의 제반시설의 배치도안을 나타냈다. 부지는 300m 정도의 산이 이어지는 丘陵地에 있고 축적ring은 해발 290m에 조성된 장소에 건설된다. 견고



〈그림 5〉 SPring-8의 建設配置

한 암반이 대부분을 차지하는 지반구조로 안정성이 강력히 요구되는 축적ring 건물의 건설장소로 적합하다. 축적ring 건물 안쪽에는 표고 345m의 축산(築山)이 있고 축적ring은 이 산을 둘러 싸고 건설된다.

한편 lineac와 synchrotron은 280m 높이의 장소에 건설되지만 장래 이것들을 단독으로 이용할 수 있는 시설을 건설할 가능성도 고려해서 넓은 공간도 확보해 놓았다. 더욱이 lineac 건물, synchrotron 건물, 축적ring 건물, 중앙연구 건물, 관리 건물을 우선 건설하고 기숙사와 같은 부대 건물 공사는 뒤로 미룰 계획이다.

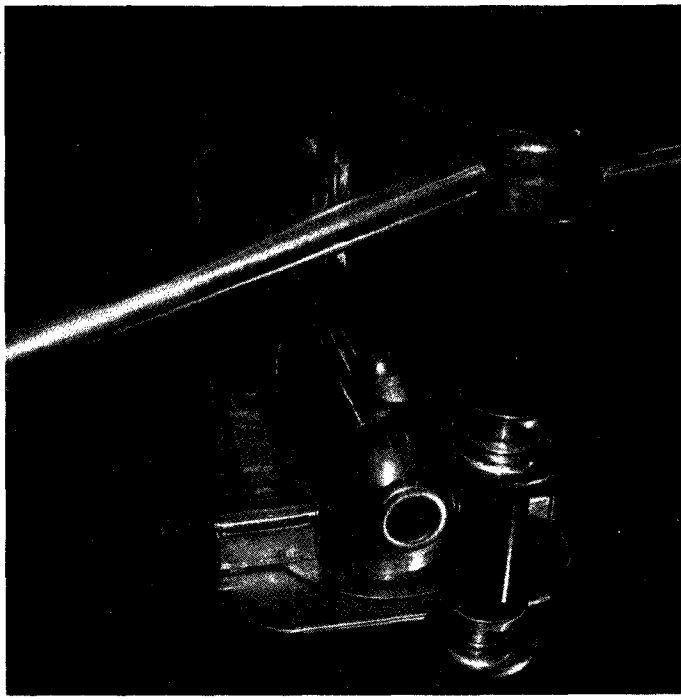
어떻게 사용되나

SPring-8에서는 몇 keV~100keV 영역의

X-선을 시료상에서 충분한 강도로 얻을 수 있다. 특히 20keV 이하의 X-선이 표준적인 길이의 undulator에서 基本波(1次光)으로 얻을 수 있는 외에 에너지가 가장 높은 X-선도 高次光으로 얻을 수 있다. 또 undulator의 파장可變 범위를 될수록 크게 해 많은 삼입광원에 대해 동시에 parameter를 변화시킬 수 있고 실험자가 제어할 수 있게 되어 있다.

삼입광원으로부터의 beam line은 38개지만 긴 직선부로부터의 beam line 4개 중 2개는 얼마동안 가속기 그룹에서 사용할 예정이다. 한편 BM으로부터의 beam line은 23개 설치할 예정으로 모두 61개의 beam line을 사용할 수 있다. 이 중 SPring-8의 운전개시때까지 건설되는 것은 ID beam line이 6개, BM beam line이 4개다.

삼입광원의 출구에서 실험station에 이르는 beam line의 길이는 70~80m다. 더 긴 beam



line이 필요한 경우에는 300m(8개), 1,000m(3개)까지 연장할 수 있다.

축적ring은 차폐벽 안에 설치되지만 안정운전을 위해 그 내부의 실내온도 변동을 1°C 이내로 억제하도록 했다. 차폐벽 바깥쪽에 실험 hole이 있고 이것을 둘러싸고 실험준비실을 배치했다. 실험준비실은 약 40m²의 넓이로 각 beam line에 2방씩 할당되어 있다. 이외에 공동사용하는 준비실과 세미나실 등이 약간 마련되어 있다. 또 RI시료를 다룰 beam line과 실험hole을 건물 남쪽 한 모퉁이에 설치한다.

SPring-8은 대학, 국·공립연구소, 산업계의 공동이용을 위해 제공되는 동시에 외국의 연구자에게도 개방된 연구시설로 할 계획이며 여기서 이루어지는 연구는 순수한 기초적인 연구에서 첨단기술의 개발연구까지 다양할 것이다. 그 이용방법으로는 4가지를 생각할 수 있다.

- (1) 일반적인 beam line의 공동이용
- (2) 특별추진 연구를 위한 beam line 점유 사용
- (3) 특정기업이나 연구기관 등, 특정한 이용자의 專用
- (4) 분석·해석 서비스

(1)은 통상적인 공동이용으로 시설측에서 설

치한 beam line을 과제의 신청·심사 절차를 거쳐 이용한다. (2)는 새로운 아이디어에 기초한 연구가 기술개발을 특정 그룹이 beam line 또는 측정장치를 설치해 일정기간 점유해서 사용하는 것으로 시설측도 이에 적극 협력한다. (3)은 특정 그룹이 그 비용을 부담해서 beam line을 설치해 일정기간 점유해서 이용하는 것으로 어느 정도의 beam line을 일반에 공개하는 것을 의무화시킬 것인가 하는 것 등이 앞으로의 검토과제다. (4)는 특정한 분석수단에 대해 분석·측정 등을 일정한 요금으로 서비스하는 것으로 인재확보 등이 이를 실현하기 위한 전제조건이 될 것이다.

결 언

SPring-8은 원자력연구소, 이화학연구소의 두 연구기관이 협력해서 건설을 추진하고 있다. 이같은 일은 일본에서는 처음이다. 또 그 이용에 있어서는 조직에 차등을 두지 않는 운영이 필요하다. 이 프로젝트를 주관하고 있는 입장에서는 각 방면의 조언을 얻어 이 새로운 시도를 성공시켜 세계 제1급의 시설로 건설되기를 바랄 뿐이다.