

## 연구용 원자로의 지속적인 역할

R. F. Lidstone

AECL

### 핵

분열 역사가 60년으로 접어들면서 연구용 원자로의 유용성이 확고히 자리잡게 되었다. 그들의 지속력은 원자력 기초 시설의 개발, 발전용 원자로 재료 및 부품의 행태 시험, 의료 및 산업용 방사성 동위원소의 생산과 그리고 재료의 구조 및 역학을 계량하기 위한 중성자 이용에서의 입증된 역할에 기반을 둘 것이다.

34년에 엔리코 페르미 및 그 동료들은 열중성자의 우라늄에 대한 충돌이 새로운 초우라늄원소를 생성해 낼 수 있음을 발견했다. 38년에 오토 한과 프리츠 슈트라스만은 우라늄에 대한 중성자 조사에 의해 생성된 일부 방사성

원소들이 바륨 또는 테크네튬(technetium, 원자번호 43을 가진 로늄(rhenium)의 화학적 동족체)과 분리될 수 없음을 발견하였다.

39년초에 리제 마이트너와 오토 프리쉬는 중성자들이 거의 같은 크기의 핵의 쌍으로 우라늄을 핵분열하도록 자극하고 있음을 빠르게 추론하였다.

이러한 생산적 일은 제어 가능한 자기 유지 연쇄 분열 반응의 가능성에 대한 거대한 관심을 일으켰는데, 이러한 관심은 42년 12월 2일 엔리코 페르미의 지도하에 수행된 CP-1의 가동과 함께 절정에 다다랐다.

오늘날 전세계적인 원자력 기반 시설은 94년에 전기 생산량의 약 17%를 공급한 운전중인 총 340GWe 설비용량의 432기와, 건설중인 39GWe 설비용량의 48기로 구성되어 있다.

원자로에서 생산된 <sup>99m</sup>Tc와 기타 방사성 동위원소들에 의한 핵의학은 매년 수백만의 진단을 공급하며, 암요법

에 의해 매년 수천명의 생명을 구하고 있다.

방사성 동위원소들은 붕합줄, 붕대 및 주사기같은 의료 물질과 화장품같은 소비 제품의 소독, 산업 장비 검사, 계통내 자재의 두께 및 밀도의 측정, 가정에서의 연기 검출 및 환경과 먹이 사슬에 이르기까지 미소 원소 운동의 추적에 널리 사용된다.

중성자 빔은 재료의 연구 및 분석에 있어서 점차 다양하게 적용되고 있는데, 촉매의 기능성, 생물 분자 또는 상업적 폴리머에 있어서 수소의 결합, 혈액같은 복잡한 유체의 성질, 제작된 부품의 잔류 응력 결정, 엔진에서의 윤활유의 흐름, 터빈 날개의 결합 위치, 고온 초전도체의 개발, 심층 암의 요법 및 풀러렌스(fullerenes)같은 신재료의 이해에 이용되고 있다.

연구용 원자로는 이들 핵 과학 기술 이점의 개발 및 제공에 크게 기여해 왔으며, 향후 계속될 것이다.

따라서 연구용 원자로의 역할 지속은 방사성 동위원소 및 원자력의 장래 수요와 지식에 기반한 재료의 기술 개발에 의존하게 된다.

**연구용 원자로(연구로)**

전통적으로 연구용 원자로는 변형 재료 또는 유용한 에너지가 아닌, 주로 지식을 산출하기 위한 핵분열로(fission reactors)로서 간주된다.

초기 핵분열 연쇄 반응 구조는 그 자체가 연구의 대상이었다. 그들을 건설하고 운영함으로써 얻어진 경험이 제1세대 고출력(>10MWt) 연구용 원자로를 건설하는 데 사용되었으며, 발전용 원자로의 재료 및 부품을 시험했다.

연구로에 토대된 전국적인 기반 시설이 구축되자 수많은 국가들이 실증 발전로와 상업 원전을 설계 및 건설했다.

기타 국가들은 따라서 입증된 개념에 토대된 연구로를 건설했으며, 발전로와 관련 기술을 습득했다.

원자력에 대한 탐색이 모든 형태의 원자로를 건설하는 데 주 자극제였지만, 연구로에서의 상대적으로 강한 중성자속의 생산이 중성자와 물질 상호작용의 연구를 촉진하였으며, 중성자의 독특한 성질을 이용하도록 만들었다.

여러 가지 고체 및 액체 시료로부터 중성자의 산란 연구는 물질구조를 규

명하기 위한 강력한 도구로서 중성자를 이용하게 하였다.

또한 중성자 변형에 의한 의료 및 산업용 방사성 동위원소 생산의 실용성이 확립되었고, 동위원소의 상업적 생산 및 분배가 점차 발전되었다.

**연구로 운영 현황**

현재 운영중이거나 건설중인 연구로는 대략 600기에 이르고 있다.

원자력의 평화적 이용에 관한 제네바 회의가 처음 개최된 55년말 현재 7국가에서 총 42개의 연구로 시설이 가동을 하고 있었다(미국 28, 소련 5, 영국 3, 캐나다 2, 프랑스 2, 노르웨이 및 스웨덴 각 1).

10년 후 처음 7국가에서 215개로 증가하였고, 기타 38개국에서 106개의 시설이 추가되었다.

75년도에는 운영중인 연구로가 372기에 이르렀다(처음 7국가에서 216기, 기타 42개국에서 156기).

20년이 지난 95년초 현재 가동중인 연구로는 297기로 감소되었는데, 처음 7개국에서 143기, 기타 51개국에서 154기이다.

최근의 'IAEA 연구로 데이터베이스(96. 4)'를 이용, 현존하는 연구로의 운영 현황이 국가·지역·출력별로 분석되

었다.

연구로의 가동성이 출력에 의한 중성자속에 주로 의존한다는 점에서 분석은 고출력(H, >10MWt), 중간출력(M, 1-10MWt), 저출력(L, 10kWt-1MWt), 영 출력(Z, <10kWt)으로 분류한다.

(표 1)은 세 출력 분류(H, M, L)의 열중성자(T) 연구로, 영출력(Z) 연구로, 고속중성자 및 원형 연구로(FP, >10kWt) 등의 다섯 지역-북남미(N&S Am), 아시아태평양(As&Pac), 서유럽(W Eur), 동유럽(E Eur) 및 아프리카 중동(Af&ME)에서의 분포를 보인다.

(표 1) 지역별 연구로 현황

Reactor Type & Status		N&S Am	As & Pac	W Eur	E Eur	Af & ME	All
H T	Op	7	10	15	19	3	54
	S/D	14	2	12	2	1	31
	Tot	21	12	27	21	4	85
M T	Op	27	17	10	9	6	69
	S/D	30	-	11	2	2	45
	Tot	57	17	21	11	8	114
L T	Op	31	14	19	6	3	73
	S/D	32	1	13	2	2	50
	Tot	63	15	32	8	5	123
Z	Op	33	12	29	9	2	85
	S/D	73	6	39	6	-	125
	Tot	106	18	68	15	2	210
FP	Op	3	3	2	4	-	13
	S/D	13	1	9	1	-	23
	Tot	16	4	11	5	-	36
All	Op	101	56	75	47	14	293
	S/D	162	10	84	13	5	274
	Tot	263	66	159	60	19	567

(표 2) 국가별 운영중 연구로 현황

Country		# Thermal Reactors			# Other Types		# All
#	Name	H	M	L	Z	FP	
1	USA	5	21	20	25	3	74
2	ex USSR	15	6	3	5	4	33
3	Germany	2	3	3	12	-	20
4	Japan	3	2	4	9	1	19
5	France	7	-	5	5	2	19
6	China	2	5	3	2	1	13
7	Canada	1	1	6	1	-	9
8	UK	-	-	5	4	-	9
9	Argentina	-	1	2	2	-	5
11	India	2	1	1	-	1	5
12	Italy	-	1	1	3	-	5
13	Rep. Korea	1	1	1	1	-	4
14	Brazil	-	1	1	2	-	4
15	Iran	-	1	1	2	-	4
16	Belgium	1	1	1	1	-	4
17	Holland	1	1	1	-	-	3
18	Austria	1	-	2	-	-	3
19	Indonesia	1	1	1	-	-	3
20	Romania	1	1	1	-	-	3
21	Switzerl d	-	-	-	3	-	3
22	Mexico	-	1	-	2	-	3
23	Czech Rep.	1	-	-	2	-	3
	All Others	10	20	11	4	-	45
	Total	54	69	73	85	12	293

67개국에서 현재 건설된 총 567기의 연구로 중에 고출력, 중간출력, 저출력 노가 각각 15%, 20% 및 22%를 차지한다.

임계로 · 균질로같은 많은 형태의 영출력 로가 37%를 나타내며, 고속 중성자 또는 원형로(추진용, 난방용, 또는 전기생산용)는 6%에 불과하다.

(표 2)와 (표 3)은 2기 이상의 가동

카자흐스탄 · 우크라이나 · 우즈벡 · 게오르기 및 벨라루스는 옛 소련으로 분류된다.

이들 표들은 8개국 그룹에서 현재의 연구로의 대부분이 건설되었음을 나타내는데, 미국 · 옛 소련 · 독일 · 영국 · 프랑스 · 일본 · 캐나다 및 중국이 현재까지 건설된 모든 연구로의 74%인 422기를 차지하였으며, 현재

(표 3) 국가별 영구 폐쇄 연구로 현황

Country		# Thermal Reactors			# Other Types		# All
#	Name	H	M	L	Z	FP	
1	USA	12	29	29	69	12	151
2	ex USSR	1	2	1	1	1	6
3	Germany	3	2	1	11	3	20
4	Japan	1	-	1	-	-	2
5	France	2	3	2	3	2	12
6	Canada	2	-	2	2	1	7
7	UK	4	3	4	14	2	27
10	India	-	-	-	3	-	3
11	Italy	1	1	4	4	-	10
12	Belgium	-	-	-	1	1	2
13	Holland	-	-	1	-	1	2
14	Switzerl d	2	-	-	1	-	3
15	Poland	1	-	1	1	-	3
16	Czech Rep.	-	-	-	2	-	2
17	Spain	-	1	1	2	-	4
18	Taiwan	1	-	-	1	1	3
	All Others	1	4	3	9	-	17
	Total	31	45	50	124	24	274

중 연구로 또는 1기 이상의 영구 폐쇄된 연구로를 가진 국가에서의 분포를 보인다.

러시아 · 라트비아 ·

가동 중인 293기의 67%인 196기를 보유하고 있다.

이들 8개국 그룹이 건설된 고출력 열 중성자 연구로의 약 70%를 차지하며, 이들의 약 65%가 가동중이다.

많은 연구로를 운영하는 3개국에서, 대학 및 기타 교육 기관이 상당 부분을 보유하고 있다. 미국 대학들은 36기의 연구로(1H, 14M, 13L 및 8Z)를 운영하고 있으며, 독일 대학들은 15기(1M, 3L 및 11Z), 캐나다 대학들은 6기(1M과 5L)를 운영하고 있다.

(표 2)에서 기타로 분류된 32개국에서는 총 45기의 연구로(10H, 20M, 11L 및 4Z)가 운영되고 있는데, 2기의 가동중 로를 가진 13개국 가운데, 8개국에는 1기의 고출력 열 중성자 로 및 그 이하의 노를 가지고 있으며, 기타 5개국은 최소한 1기의

가동 중인 293기의 67%인 196기를 보유하고 있다. 이들 8개국 그룹이 건설된 고출력 열 중성자 연구로의 약 70%를 차지하며, 이들의 약 65%가 가동중이다. 많은 연구로를 운영하는 3

중간 출력 열중성자로를 보유하고 있다.

기타 19개국에는 단일 설비(2H, 11M 및 6L)가 운영되고 있다.

지금까지 영구 폐쇄된 연구로의

80%를 5개국이 차지하고 있는데, 미국이 55%, 영국이 10%, 독일이 7%

및 프랑스, 이태리가 각각 4%이다.

<표 3>에 기타 국가로 분류된 17개국은 각각 1기의 폐쇄로를 가지고 있다.

**이용 추이**

<표 4>는 현재 가동중인 54기의 고출력 열중성자 연구로 및 건설중인 신규 5기의 특징을 요약하고 있다.

(표 4) 고출력 연구로 현황

	#	Reactor	Country	Power MWt	# Bms	Age (y)
Source	C	PIK	Russia	100	16	-
	C	FRM-2	Germany	20	12	-
	1	BER-2	Germany	10	10	4.8
	2	JRR-3M	Japan	20	9	6.8
	4	ORPHEE	France	14	9	15.3
	5	HFR-Gren	France	57	18	24.7
	6	NFBR	USA	20	15	28.3
	7	MURR	USA	10	6	29.4
Mat Testing	8	HFBR	USA	30	9	30.4
	C	SPHINX	Kazakhstan	200	3	-
	1	RBT-10/1	Russia	10	0	11.3
	2	RBT-10/2	Russia	10	0	12.3
	3	HFETR	China	125	0	16.3
	4	IEWG 1	Kazakhstan	60	-	24
	5	JMTR	Japan	50	0	27.9
	6	IRT-T	Russia	40	0	28.6
	7	ATR	USA	250	0	28.7
	8	MIR.M1	Russia	100	0	29.3
	9	OSIRIS	France	70	0	29.5
RI	10	MR	Russia	40	0	32.3
	11	HBWR	Norway	25	0	36.8
S	C	MAPLE-1	Canada	10	0	-
	1	HFIR	USA	85	4	30.6
	2	SCARABEE	France	100	0	13.8
Multi Purpose	2	PHEBUS	France	40	0	17.6
	3	CABRI	France	25	0	32.8
	C	ETRR-2	Egypt	22	5	-
Multi Purpose	1	HANARO	Rep. Korea	30	7	1.1
	2	ESSALAM	Algeria	15	7	2.3
	3	RP-10	Peru	10	6	7.3
Multi Purpose	4	RSG-GAS	Indonesia	30	6	8.7
	5	DHRUVA	India	100	19	10.6
	6	IRT-1	Libya	10	10	13.0
	7	TRIGA-Pit	Romania	14	2	16.3
	8	MARIA	Poland	30	8	21.3
	9	WWR Alma	Kazakhstan	10	6	28.4
	10	Sverdlovsk	Russia	15	10	29.9
	11	SAFARI	S. Africa	20	6	31.0
	12	Obninsk	Russia	12	6	31.4
	13	SILOE	France	35	3	33.0
	14	FRJ-2	Germany	23	30	33.3
	15	HFR-Petten	Netherlands	45	12	34.3
	16	SM-2	Russia	100	5	34.4
	17	BR-2	Belgium	100	9	34.8
	18	WWR Kiev	Ukraine	10	10	35.3
	19	IGR	Kazakhstan	10	9	35.3
	20	JRR-2	Japan	10	13	35.4
	21	ASTRA	Austria	10	10	35.5
	22	CIRUS	India	40	31	35.7
	23	R-2	Sweden	50	8	36.0
	24	DR-3	Denmark	10	8	36.2
	25	St. Ptrsburg	Russia	18	17	36.3
	26	Tashkent	Uzbekistan	20	9	36.5
	27	Budapest	Hungary	10	8	37.0
	28	HWRR-II	China	15	7	37.5
	29	HIFAR	Australia	10	22	38.2
	30	NRU	Canada	135	26	38.3
	31	LR-15	Czech Rep.	10	9	38.5
	32	AM	Russia	10	4	41.8

〈표 5〉 기타 국가의 중성자선원 설비

#	Facility	Country	Power MWt	# Bms	Age (y)
C	TRIGA-I	Morocco	2	4	-
C	SINQ(Spall.)	Switzerland	0.6~0.9	8	-
C	SUR-100	Slovak Rep.	~0	-	-
C	SRR-1	Syria	0.03	-	-
1	MNSR	Ghana	0.03	-	1.3
2	RECCH-2	Chile	2	4	6.5
3	TRIGA-II	Bangladesh	3	4	9.5
4	ISIS(Spall.)	UK	0.16	18	11.5
5	DUBNA(Fast)	Russia	2	10	12
6	UWI Slowpoke	Jamaica	0.02	-	12.0
7	TRIGA Puspati	Malaysia	1	4	13.8
8	TR-2	Turkey	5	-	14.3
9	Dalat	Viet Nam	0.5	4	14.3
10	TRICO-II	Zaire	1	4	24.0
11	TRIGA-Inin	Mexico	1	4	27.3
12	RA-3	Argentina	5	7	27.6
13	Tehran	Iran	5	7	28.3
14	PARR-1	Pakistan	9	7	30.3
15	RPI-Sacavem	Portugal	1	7	30.3
16	IRT-DPRK	N. Korea	8	10	30.6
17	IRT-C Riga	Latvia	5	10	30.6
18	Lubljana	Slovenia	0.25	6	30.8
19	IAN-R1	Colombia	0.03	2	31.2
20	PRR-1	Philippines	3	6	32.6
21	TRR-1/M1	Thailand	2	6	33.4
22	FIR-1	Finland	0.25	5	34.0
23	IRT-Sofia	Bulgaria	2	11	34.5
24	DEMOCRITOS	Greece	5	6	34.7
25	THOR	Taiwan	1	6	34.9
26	IRR-1	Israel	5	8	35.8
27	TRIGA RC-1	Italy	1	7	35.8
28	RA	Yugoslavia	6.5	6	36.3
29	IEA-R1	Brazil	2	12	38.5

가동중인 고출력 노의 대부분(32기)이 재료 시험, 동위원소 생산 및

Grenoble의 명성은 고출력( $\sim 1 \times 10^{19} \text{ nm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 의 섭동(perturbed) 열중

중성자빔 응용을 위한 다목적 연구로이다.

이들 다목적로 중 22기는 30년 이전에 가동을 개시하였고, 6기는 15년 이하이며, 1기는 건설중이다.

프랑스에서의 3기는 안전성 연구 전용이다. 재료시험 전용 11기중 6기는 약 30년되었으며, 3기는 20년 이하, 1기는 건설중이다.

65년에 냉중성자 원과 1개의 반경 및 8개의 접선 방향 중성자빔 튜브를 갖춘 첫번째 중성자원 전용 연구로인 미국의 HFBR이 가동을 개시했다.

기타 3기의 중성자원 전용 연구로(세계 최고의 중성자원인 HFR-Grenoble, MURR 및 NFBR)가 뒤를 이었다.

프랑스 HFR-Grenoble의 명성은 고출력( $\sim 1 \times 10^{19} \text{ nm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 의 섭동(perturbed) 열중

성자속)과 다양한 중성자원에 대한 총 50가지의 계측 가능 때문이다.

65년에 주로 초우라늄 동위원소를 생산하기 위하여 가동을 개시한 미국의 HFIR은 또한 4개의 중성자빔을 공급한다.

80년에 가동을 개시한 프랑스의 원형 중성자원인 ORPHEE는 총 20개의 중성자빔용 9 수평찬넬로부터  $\sim 2 \times 10^{18} \text{ nm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 의 최대 중성자속을 공급한다.

최근에 건설된 JRR-3M과 BER-2는 현존 설비내에 완벽하게 재건설된 중성자원 전용이다.

현재 건설중인 PIK 및 FRM-2는 또한 각각  $\sim 1 \times 10^{19} \text{ nm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ,  $\sim 8 \times 10^{18} \text{ nm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 의 비섭동(unperturbed) 열중성자 속을 공급한다.

DHRUVA, HANARO, RSG-GAS-30 등 3기의 다목적 연구로는 냉중성자원을 갖추고 있으며, 빔 튜브의 일부가 중성자빔 응용을 위하여 접선 방향으로 되어 있다.

주요 중성자 연구용으로 가동중인 27기의 열분열 연구로와 1기의 펄스 속분열로(pulsed fast-fission reactor), 1기의 펄스 파쇄로의 특징들은 〈표 5〉에 나타나 있다. 또한 건설중인 1기의 정상 파쇄로와 3기의 열분열로도 나타나 있다.

러시아에서 최근 Dubna에 재건설된 IBR-2 펄스 속중성자 연구로는 중성자산란 연구용으로서 St. Petersburg에 있는 18MWt 연구로를 대체

한다.

IBR-2는 ~1500MWt까지의 펄스 동안  $\sim 10^{28} \text{ nm}^2\text{s}^{-1}$ 의 최고 열중성자 속도에 도달한다.

지난 10년동안 파쇄 중성자 연구로가 중성자 산란용 설비로서 핵분열로와 경쟁하기 시작했다.

영국에서는 현재 세계 최고의 펄스 파쇄 연구로인 ISIS가 폐쇄된 DIDO와 Pluto 연구로를 인계하였다. ISIS의 시간 평균 열중성자속이  $\sim 1 \times 10^{16} \text{ nm}^2\text{s}^{-1}$ 에 불과하지만, 최대치는 HFR-Grenoble의 최대 중성자속과 유사한  $\sim 1 \times 10^{19} \text{ nm}^2\text{s}^{-1}$ 에 이른다.

스위스의 SINQ 정상 파쇄 연구로는 최근 폐쇄된 SAPHIR에 이어 곧 가동될 것이다. Zr피복 납봉의 중수냉각 표적을 갖춘 SINQ는  $\sim 0.6\text{MWt}$ 의 중성자빔 출력에서 중수 빔튜브 용기속에  $\sim 1.5 \times 10^{18} \text{ nm}^2\text{s}^{-1}$ 의 최대 열중성자속을 발생한다.

연구로의 초기 정의가 가속기-추진 핵파쇄원-에는 엄격히 적용되지 않지만 파쇄와 융합이 모두 핵반응이므로 변형된 재료 또는 유용한 에너지가 아닌 지식을 산출하기 위하여 주로 건설된 핵반응로로서 포괄적으로 연구로를 정의할 수 있다.

의미에 관계없이 핵파쇄 중성자 발생기는 오래동안 이용 측면에서 핵분열 설비와 유사한 것으로 간주되어 왔다.

예를 들면, ING 연구는 정상 열중성자 설비의 납-비스무쓰(bismuth)

표적에 1-GeV 양성자를 쏘면 중수 용기내에  $\sim 10^{20} \text{ nm}^2\text{s}^{-1}$ 의 최대 중성자속을 발생시키는 선형 가속기를 예측했다.

용도에 있어서는 중성자빔 연구, 원자력 개발을 위한 재료 시험과 동위원소 생산이 제안되었다.

중간 및 저출력 핵분열 연구로는 실제 발전로 환경을 만드는 중성자속 강도가 없음에도 불구하고, 국가 원자력 프로그램을 개시하는 수단으로서 적절하며, 재료 과학과 기타 응용, 즉 추적 동위원소 생산, 중성자 방사화 분석 및 중성자 사진과 재료 특성에 대한 연구에 적합하다.

**장래의 이용 예측**

국가적 핵 기반 시설의 개발, 발전로 재료 및 부품의 시험, 의료 및 산업용 동위원소의 생산 및 재료의 구조 및 역할을 탐침하는 중성자 적용을 위한 연구로의 유용성은 지난 50년 이상 굳게 확립되어 왔다. 연구로의 장래 역할은 의심할 여지없이 이 입증된 이용에 근거할 것이다.

광범한 원자력 프로그램을 확립하기를 원하는 국가들이 원자력 발전을 착수하기 전에 중간 및 저출력 열중성자 연구로를 건설하고 운영하는 경험으로부터 얻는 것은 분명히 명백하다.

원자력이 실제적인 기술이므로 개량 핵연료 주기와 발전로용 노심 장비의 개발은 고효율 연구로에서의 루프

및 캡슐 조사에 계속 의지할 것이다.

동위원소의 핵의학 및 산업 응용의 성장은 연구로가 상업적으로도 대체 수단과 계속 경쟁할 수 있도록 할 것이다.

봉소 중성자 포획 요법(BNCT)의 임박한 개발은 동물 및 인간에 대한 임상적 시도로부터 입증된 암 치료의 국제적 시행으로의 천이를 자극할 지 모른다.

더욱이 재료 기술에 있어서 경제성과 국가적인 혁신적 능력의 연계 인식은 세계적인 중성자빔 연구와 국가적 및 국제적인 개량 중성자원 설비의 개발을 촉진할 것이다.

**1. 원자력의 지원**

아시아에서는 인구 및 경제 성장으로 인해 1인당 전기 소비 및 전반적 전력 수요가 증가될 것으로 기대되며, 2000~2015 기간 동안 37~71 GWe의 원자력 설비가 추가될 것이다.

아프리카 및 남미에서는 보다 완만한 경제 성장으로 인하여 4GWe의 추가 설비에 그칠 것이며, 2000년부터 2015년까지 유럽 또는 북미에서의 신규설비는 불투명하다.

산업 관측통들은 신규 원자력 건설이 입증된 설계, 즉 경수로 및 가압중수로의 조합에 의존할 것으로 기대하고 있다.

연구로는 미래의 원자력 개발을 지원하는데 두 가지 주요 역할, 즉 재료

〈표 6〉 CANDU 연료다발 조사

Parameter	CANDU	IRF	NRU*
Number of Fuel Elements	37	37	36
Enrichment(wt% <sup>235</sup> U)	0.7	0.7	1.7
Bundle Power(kW)	1000	~1000	1046
Peak Outer Element Rating(kW/m)	64	69	78
Maximum vs. Average Element Power	1.13	1.13	1.22
Axial Gradient (max./ave.)	1.01	1.07	1.02
Outer Element Power Tilt (max. el./ave. el.)	~1.0	1.02	1.01

\* Light-Water coolant

시험 및 기초 기술 개발을 수행할 것이다.

독립적 원자력 계획을 유지하고, 연료 및 장비의 제작을 국산화하거나, 발전로 기술을 수출하기를 원하는 국가들은 원래대로 제작된 연료와 기타 원자로 부품의 조사 시험을 위하여 고출력 연구로를 계속 사용할 것이다.

현재 또는 가까운 장래에 원자력에 대한 관심을 가진 기타 국가들은 요원 훈련 및 국가적 핵 전문기술을 지지하기 위한 다목적 연구로 설비를 계속 고용할 것이다.

연구로를 보유하고 있지 않지만 원자력을 에너지 대안으로 확립하기를 원하는 국가들은 원전 개발을 위한 신중한 규제 및 운영 선례를 확립하는 신뢰성있는 방안으로서 연구로의 건설과 운영을 사용해야 한다.

고연소에서 출력 요동시 분열 가스 누설에 관한 연구는 경수로 발전로를

지원하는 데에 있어서 최신의 연구로 이용의 좋은 예이다.

Obrighheim의 PWR과 Monticello의 BWR에서 22-69 Mwdkg<sup>-1</sup> U의 연소도까지 조사된 상업적 연료봉이 Petten의 HFR과 Studsvik의 R-2에서 전형적 평균 수명 정격 ~20 kWm<sup>-1</sup> 으로부터 최고 정격 35~45 kWm<sup>-1</sup> 까지 요동되었다.

아시아 또는 기타 지역의 여러 국가에서 고출력 연구로는 개량형 연료 주기 또는 기타 제조 회사로부터 고연소 UO<sub>2</sub> 연료 집합체의 행태를 정의하는 유사한 시험을 위하여 잘 이용될 수 있다.

가압중수로를 지원하는 전형적 연구로 이용의 예는 1,000kW까지의 출력에서 매우 균일한 조건하에 천연 UO<sub>2</sub> CANDU 연료 다발의 조사를 포함한다.

〈표 6〉은 NRU 연구로의 성과와 제안된 캐나다의 IRF(조사 연구 설비) 개념의 성능을 비교한다.

조사되지 않은 1,000kW에서 운전 중인 CANDU-6 천연 UO<sub>2</sub> 다발을 나타내기 위하여 36개의 1.7%농축 원형 다발이 NRU에서 수직으로 조사되었다.

IRF에서 천연 UO<sub>2</sub> CANDU 다발들은 냉각재로서 D<sub>2</sub>O를 사용하는 IRF 용기의 중심에서 충분히 대표적 인 조건시 수평적으로 조사될 수 있

다.

## 2. 방사성 동위원소 생산

일본에서의 경험대로 원자로 및 싸이클로트론에서 생산된 동위원소의 이용은 지난 30년 동안 크게 성장해 왔다.

연구로 생산 의료용 동위원소중에 <sup>99m</sup>Tc로부터 얻어진 <sup>99m</sup>Tc는 핵 의학진단에 있어서 지배적이다.

연구로에서 생산된 기타 주요 방사선 의약품은 <sup>125</sup>I와 <sup>131</sup>I를 포함한다.

발전로에서 생산된 <sup>60</sup>Co가 방사선 처리 산업을 위한 주요 감마선원인 반면, 연구로에서 생산된 <sup>192</sup>Ir이 방사선 사진에 의한 비파괴 검사를 위한 가장 중요한 방사선원이다.

선진국에서는 의료 및 산업용 동위원소들이 상업적으로 세계적인 시장에서 공급된다.

그러나 많은 개발도상국의 국가 원자력 기관들은 위에 언급된 동위원소들을 자체 생산함으로써 핵의학 및 산업 응용의 고유의 성장을 계속 보장할 것이다.

이러한 분야의 미래 연구로 이용을 설명하기 위하여, 전형적인 지역 동위원소 생산 시나리오가 10MWt MAPLE 설비 개념에서 모의되었으며, 그 결과는 다음과 같다(가정 : 처리기간 2일, 80% 추출 효율).

- 유압-캡슐에서 18g MoO<sub>3</sub>의 7일간 조사시 0.48Tbq(13Ci)의 <sup>99</sup>Mo의 생산

• 중간 반사체에서 45g TeO<sub>2</sub>의 표적의 7일간 조사시 0.37Tbq(10Ci)의 <sup>131</sup>I의 생산

• 두번의 21일동안 총 ~60mg <sup>124</sup>Xe을 포함하는 캡슐의 조사시 1Ci(37GBq) 생산(이 시나리오는 <sup>126</sup>I의 방사능이 <sup>125</sup>I 방사능의 0.05% 이하까지 붕괴할 수 있게 하는 ~28주의 붕괴 기간을 허용)

• 내부 반사체에서 21일 동안 140 펠렛(총 2.73g)을 포함하는 4개의 <sup>192</sup>Ir 캡슐 집합체를 조사함으로써 37Tbq(1.0kCi)의 <sup>192</sup>Ir 생산

**3. 붕소 중성자 포획 요법**

붕소 중성자 포획 요법(BNCT, Boron Neutron Capture Therapy)는 종양 세포에 <sup>10</sup>B를 포함하는 생화학제를 위치하고 주 세포에 치명적인 <sup>10</sup>B(n, α)<sup>7</sup>Li 반응을 만드는 열중성자를 환자에게 쏘는 것에 의존하는 유망한 암 치료법이다.

BNCT의 재개발은 호의적인 일본의 임상실험에 의해 자극받았다. 중요한 연구개발이 <sup>10</sup>B의 선택성과 건강한 조직에 최소한의 피폭을 주면서 종양 세포에 대한 열중성자의 투여 문제를 해결하기 위하여 수행되었다.

일본의 MITRR과 KUR, 미국의 BMRR과 MITR-II 같은 연구로의 열중성자가 HFR-Petten의 조절된 빔 튜브와 함께 많은 연구 개발을 위한 중성자를 공급하였다.

심층 종양에 대하여 최근 개발의 초

점은 광자 및 속/열중성자에 최소 오염된 열외중성자에 있어왔다.

KUR D<sub>2</sub>O 설비는 중성자 스펙트럼의 미세조정이 가능하도록 변경되었다.

미국의 10MWt 의료요법로(MTR)를 포함하는 차세대 요법설비에 대하여 여러 가지 개념이 정의되어 왔다.

최신의 다목적 연구로의 환경에서 BNCT 설비를 공급하도록 열외중성자 개념이 정의되었다.

그것은 D<sub>2</sub>O냉각 베릴륨(beryllium)과 D<sub>2</sub>O냉각 알루미늄 컬럼(column), 알루미늄-리튬 필터 및 카드늄-비스무스 차폐체를 사용한다.

<표 7>은 기대된 성능과 제안된 MTR의 개념, HFR-Petten에서의 측정치를 비교한 것이다.

**4. 중성자 빔의 응용**

지난 10년 동안 개량형 중성자선원(ANS, Advanced Neutron Source) 사업은 많은 핵분열 중성자선원의 개발을 촉진해 왔다.

초기 ING사업과 같이 그것은 현재 최고의 정상 선원보다 중성자 밝기에 서 약 5배 증가하는 10<sup>20</sup> nm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>에 접근하는 정상 열중성자속을 목표로 한다.

핵무기 등급의 핵분열 물질의 이용과 생산을 피하는 35% 농축 노심이

(표 7) BNCT 설비 성능

Parameter	10MWt MAPLE	MTR Concept	HFR Petten
Epithermal Neutron Flux (10 <sup>13</sup> m <sup>-2</sup> S <sup>-1</sup> )	26 (4%)*	18	0.33
Total Neutron Flux (10 <sup>13</sup> m <sup>-2</sup> S <sup>-1</sup> )	30 (4%)*	20	0.38
Epithermal/Total Flux	0.85	0.91	0.87
Total Neutron Current to Flux Ratio	0.72	0.71	-
Treatment Time(min.)	~6	8	434
Gamma-to-Epithermal Neutron Flux Ratio	0.006	0.007	~0.1

\* statistical uncertainty(one standard deviation)

개발되었지만, 그 사업은 95년초에 주로 확산 및 비용 문제로 취소되었다.

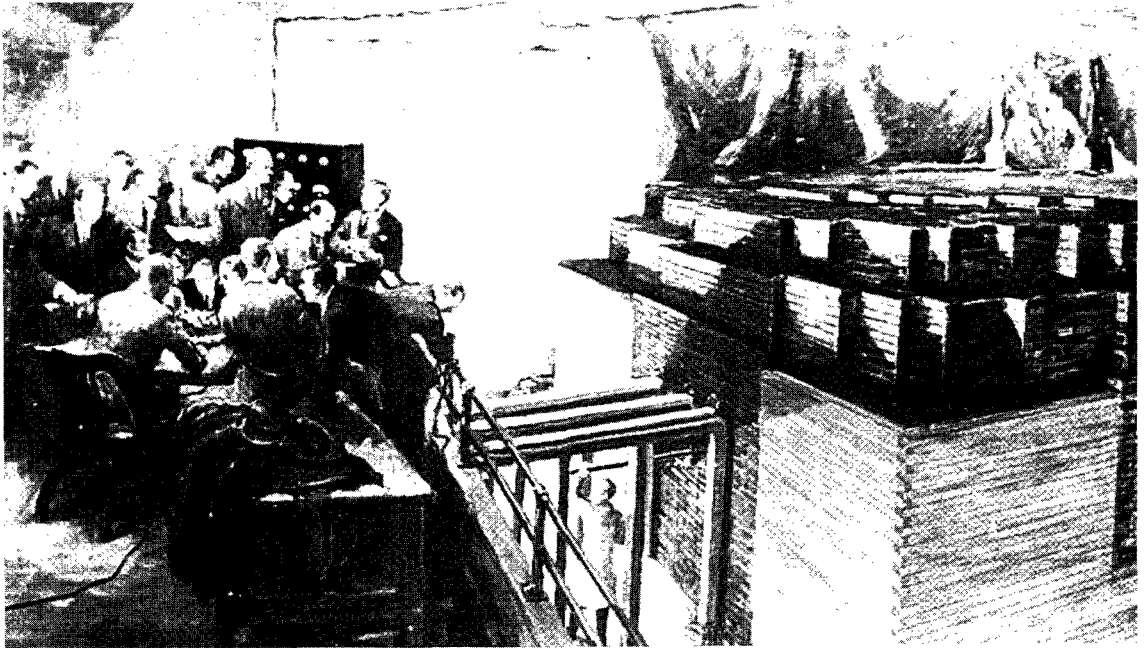
따라서 개량된 중성자 선원에 대한 미국의 장래는 신규 1MWt의 펄스 핵 파쇄 선원의 건설과 함께 HFBR, HFIR 및 NBSR의 재건설에 달려있으나 아마 현실비를 이용하게 될 것이다.

캐나다에서 IRF같은 신규 국가적 선원의 필요성은 명백하다.

서유럽에서는 ISIS, ORPHEE 및 최근에 재건설된 HFR-Grenoble 연구로의 계속된 운영, SINQ의 가동과 HFR-Grenoble과 근접한 성능을 얻기 위해 93%농축 소형노심에 의존하는 FRM-2의 건설에 초점이 모아져 있다.

동유럽에서는 IBR-2 설비가 폐해된 기금으로 운영되고 있지만 PIK를 완성할 가망성은 흐릿하다.





세계 최초의 연구로 CP-1의 최초 임계장면(1942. 12. 2, 미국 시카고 대학)

아시아에서는 종래의 다목적 설비에서 중성자 연구를 지속하는 한편 HANARO, JRR-3M 및 RSG-GAS-30같은 최근에 건설된 국가적 설비의 이용을 개발할 것이다.

지난 10년간 몇몇 신규 중성자 선원의 출현에도 불구하고 중성자빔 연구의 진전에 크게 기여해 온 많은 고출력 연구로가 그들의 수명을 다하고 있으며, 기술적 퇴화 문제 즉, 접선 방향 빔이나 냉선원, 중성자 안내관의 결여로 제한을 받고 있다. 또한, 많은 국가에서 고출력 연구로의 부재는 중성자 산란 연구의 선택을 제한한다.

따라서 전세계적인 중성자빔 응용의 성장을 편리하게 하기 위하여, 빔 튜브에서 약  $2 \times 10^{18} \text{ nm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 의 섭동 열중성자속을 공급하는 신규 국가적 설비에 대한 계속된 필요가 있다.

### 5. 다목적 설비와의 관계

BNCT의 협력을 제외하고 위에 언급된 연구로 이용의 추세는 최근 건설된 HANARO와 RSG-GAS-30과 같은 고출력 다목적로에 대한 출판된 계획과 일치한다.

두 설비들은 가압 경수 및 중수로를 지원하는 소규모 연료 및 재료 시험을 수행하거나 동위원소의 생산과 열 및 냉 중성자 빔을 이용하는 기초 및 응용연구를 돕기 위하여 의도된다.

BNCT의 연구 개발 단계에서 시행으로의 진전에 대한 미래에 비추어 최근 다목적 연구로 설비를 계획하는 국가들은 암요법을 위한 에너지 조절 가능 열외중성자 켈럼을 포함하기를 원할 것이다.

원자력의 국산화 계획이 없는 국가에서는 10 MWt MAPLE 설비같은

저출력 연구로가 빔 튜브에서  $1.7\text{--}2.3 \times 10^{18} \text{ nm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 까지의 열중성자속을 공급하며, 그것은 세계적인 중성자빔의 실험을 조장할 것이다.

2에서 인용된 동위원소 생산 성능은 그러한 설비들로 하여금 천연 Mo에서 2.5-3.5 Cig<sup>1</sup>의 포화 <sup>99</sup>Mo 방사능을 가진 중요한 동위원소 생산 역할을 수행할 수 있게 할 것이다.

### 결 어

연구용 원자로는 원자력 기초 시설의 개발, 발전로 재료 및 부품의 행태 시험, 의료 및 산업용 방사성 동위원소의 생산, 그리고 재료의 구조 및 역학을 계량화하기 위한 중성자 이용을 위하여 계속 존속하게 될 것이다. ☞