

蘇聯의 RBMK 原子爐 安全性 改善

소련은 그들의 RBMK - 1000과 RBMK - 1500 原電의 安全性을 改善하기 위하여 노력하고 있다. 다음은 Atomnaya Energiya 誌에 소련側이 發表한 改善內容을 정리한 것이다.

체르노빌事故 이래 運轉中인 RBMK형 발전소에 시행된 고도의 대책들은 사고의 규모를 악화시켰던 결점들을 제거시켰다.

이들 결점들중 가장 중요한 것은 정(正)의 보이드 계수와 충분히 신속하게 작동하지 못한 원자로 보호장치에 있다고 한다. 원자로 보호계통의 운전속도는 모든 제어봉을 爐心 속으로 0.7m 낮춤으로써 증가되었다.

이것은 위에서 삽입되는 제어봉의 효과를 증가시키고 또한 노심 속으로 제어봉이 삽입하는데 필요한 시간을 2초씩 단축시킨다.

運轉反應度の 유보는 RBMK - 1000에 대해서 43~48개, RBMK - 1500에 대해서는 53~58개까지 수동 제어봉이 증가되었다. 이것은 노심의 중간부분(높이로)에 위치한 제어봉의 수와 큰 미분제어 값을 보유하기 때문에 제어봉의 강하시점에서 보호장치의 運轉速度가 상당히 증가되었다.

비상정지신호에 이은 제어봉에 의한 負(-)反應의 초기유입율의 결과는 적어도 $0.5\beta/\text{sec}$ 이다. β 는 지발중성자의 분율이다. 또한 安全性과 信賴性을 증가시키기 위해 運轉中인 RBMK에 설치된(설치될) 원자로 제어 및 보호장치에서 더욱 개선된 사항들을 다음과 같다.

- 아래로 부터 爐心속에 진입되는 흡수봉의 수는 RBMK - 1000의 경우 32개, RBMK - 1500의 경우 40개로 증가되었다.

- 긴급정지신호를 받아서 이들 축소된 흡수봉을 노심속에 진입시키는 설비가 고안되었다.

- 어떠한 원자로 상황에 대해서도 反應度の 계수가 표시된다.

- 반응도 유보가 수동제어봉 30개 밑으로 떨어질 때 원자로의 자동정지가 일어난다.

- 제어 및 보호계통 제어봉을 위한 구동은 긴급정지신호에 이은 제어봉의 완전한 삽입을 위한 시간을 단축시키기 위하여 18~20초에서 10~12초로 조정되었다.

- 고속운전 긴급정지 장치의 개발과 이의 운전중인 발전소로의 도입을 위해 특별히 중요성을 부과하였다. 이것은 매우 빠른 반응의 폭주와 함께 예측할 수 없는 사고 상황에 있어 매우 높은 신뢰도로써 연쇄반응을 멈추도록 의도한 것이다. 운전중인 발전소에 1987년말까지 설치 완료키로 계획된 이러한 고속운전 사고예방장치는 2~2.5초내에 3β 의 율로 負反應의 유입을 확보해야 한다. 그러나 불행하게도 긴급정지장치에 대해 더 이상 상세한 내용은 발표되고 있지 않다.

보이드係數의 重要性

체르노빌事故의 교훈은 우리에게 규제 위반은 예측할 수 없는 사태를 유발한다는 사실을 생각하게 한다. 따라서 RBMK의 안전성을 개선하는데 중요한 방법의 하나는 운전수칙이 무시될 때 원자로의 폭주를 배제할 정도로 반응도의 보이드계수를 감소시키는 것이었다.

소련은 이것을 달성하기 위해서 RBMK 炉에 있어 반응도의 보이드 계수에 영향을 미치는 요인들을 더욱 상세히 규명하기 위한 새로운 데이터를 계산하고 있다. 흡수봉의 추가와 노심속의 제어봉 수의 변화에 대한 영향은 1986년 10월과 11월중 체르노빌과 Smolensk 발전소의 원자로에서 수행된 특별조사에서 더욱 심도 있게 분석되었다.

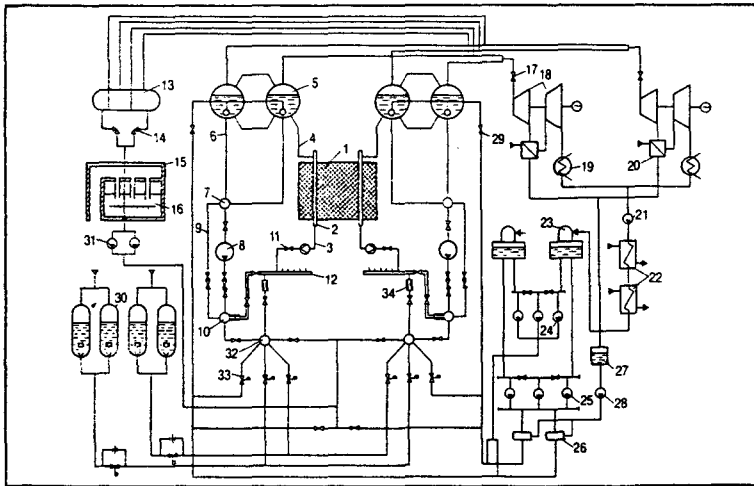
이러한 연구를 근거로 燃料燃焼의 정도에 따른 반응도의 보이드계수의 의존도, 연료채널再裝填率 그리고 노심속의 제어봉수에 대한 수정된 산정이 RBMK - 1000과 1500에 대해서 도출되었다. 예상사고의 결과에 대한 평가는 반응도의 보이드 계수가 보이드 fraction 單位當 2β 를 초과해서는 안된다는 것을 보여주고 있다. 이러한 분석은 수동제어봉을 30개까지 증가시키고 RBMK - 1000과 RBMK - 1500의 노심 안에

각각 80개와 55개의 추가 흡수봉을 설치함으로써 운전중인 원자로에서 달성할 수 있음을 보여주고 있으며, 이미 이러한 방법들은 시행되고 있다. RBMK-1500의 반응도 보이드계수는 Active Zone에 있는 보다 많은 강철 때문에 RBMK - 1000의 반응도 보이드계수 보다 다소 낮다는 것을 알아야 한다. 이것은 RBMK - 1500의 核燃料集合体에 설치된 열교환 강화장치 때문이다.

새로운 改善策을 도입한 RBMK - 1000과 RBMK - 1500에서의 사고발생 진전에 대한 상세한 연구는 제어 및 보호장치가 반응도의 감소를 확실하게 하며, 이제 신뢰할 수 있으며, 긴급냉각장치는 燃料棒의 손상에 대한 한계를 초과하지 않도록 보증할 수 있음을 보여주고 있다.

反應度の 보이드 係數를 감소시키고(추가 흡수봉의 설치로), 제어봉에 대한 최소한 허용반응 여유도를 증가시키는 것 외에 안전성을 증가시키는데 목적을 둔 많은 다른 방법들이 시행되었다.

특히, 中央制御室은 현재 긴급보호장치를 차단하는 채널중에 어떤 것이 작동하지 않는지를 보여주는 채색된 패널을 갖추고 있다. 이 패널은 어떠한 조건하에서도 운전원에 의해 방해받지 않도록 장치되어 있다.



Key 1 - core. 2 - fuel Channel. 3 - water supply pipe. 4 - steam-water pipeline. 5 - drum/separator. 6 - downcomer. 7 - intake collector. 8 - main circulation pump. 9 - by-pass. 10 - collector. 11 - shut-off control valve. 12 - group distribution header. 13 - steam header. 14 - steam discharge valve. 15 - accident localization system. 16 - emergency cooling system water supply. 17 - pressure regulator. 18 - turbogenerator. 19 - condenser. 20 - separator/steam superheater. 21 - condensate pump. 22 - heater. 23 - deaerator. 24 - emergency supply electric pump. 25 - electric feed pump. 26 - feed water heater. 27 - condensate collector. 28 - condensate pump for separator/steam superheater. 29 - level regulator. 30 - water storage system for emergency cooling system. 31 - emergency cooling system pump. 32 - emergency cooling system header. 33 - emergency cooling system fast operation valve. 34 - leakage control device.

(그림 1) RBMK - 1500原電의 回路圖

발전소 운전의 안전성을 보장하는 또 다른 방법은 노심 전반에 걸쳐 軸狀과 放射狀으로 노심출력감시를 철저히 하는 것이다. 개발계획이 이 지역에서 진행중에 있고, 특수한 소형 에너지방출탐지기가 제작되어 운전중인 발전소에 설치되고 있다. 또한 發電所의 주요 파라미터를 진단, 기록하는 기존의 장치를 현대화하는 작업이 진행되고 있다. 이 개발 목적은 비정상상태의 발달을 규명하여 運轉員으로 하여금 잠재적인 긴급상태의 진전을 감시하는데 도움을 주고, 運轉員의 조치 사항을 기록하기 위함이다.

개선된 장치는 신뢰할 수 있는 독립된 전력공급시설과 함께 所内の 별도 시설물 내에 위치하고 있고 또한 기존 컴퓨터 정보장치와는 별개이다.

그 밖에 운전중에 金屬製品의 상태를 감시하기 위해 초음파 및 음파방출감시기법의 개발에 많은 관심을 기울였다.

核燃料 濃縮度의 增加

RBMK原電의 안전성을 향상시키기 위한 추

가 조치는 핵연료농축도를 증가시키는데 집중되었다.

첫단계로서 수 년전에 2% 농축으로의 변경이 추진되었다. 1.8%에서 2%로 핵연료 농축도를 증가시킴으로써 반응도의 보이드 계수는 보이드 fraction 單位當 1~1.5 β 만큼 감소되고, 연료 연소도는 15%나 증가됨이 알려졌다. 기존 RBMK는 1975년부터 2%로 농축된 연료로 전환되었다.

過渡 및 긴급상태에 대한 조사는 새로운 연료를 裝填한 원자로의 주요 파라미터가 허용할 수 있는 한계내에 있고, 안전장치가 신뢰할 수 있는 炉心冷却을 보증한다는 것을 보여주고 있다. 또한 이론적 및 실험적 연구는 2%에서 2.5%로 핵연료농축도를 증가시킴으로써 反應度의 보이드係數는 보이드 fraction單位當 1.5 β 씩 더 감소될 수 있음을 보여주고 있다. 연료의 이러한 변경으로 RBMK-1000에서는 어떤 문제도 야기되지 않았다.

2.4% 농축의 146개 핵연료집합체에 대한 시험이 Leningrad 원자력발전소에서 수행되었으며 이러한 向上에 근거하여 RBMK발전소에 농축

(表 1) 2%농축핵연료 노심에서의 RBMK-1500의 반응도 보이드계수의 수동제어봉과 추가흡수봉에 대한 의존관계

	Variant no.											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
No. of manual control rods	36	50	65	75	55	55	65	75	45	30	30	55
No. of additional absorbers	0	0	0	0	40	55	55	55	55	55	90	90
Burn-up (MWd/kg)	21.6	20.75	20.3	19.85	18.6	17.3	17.3	16.85	18.26	-	-	15.9
Void coefficient of reactivity (in terms of β per unit of void fraction)	3.3	2.0	1.4	0.7	0.8	-0.3	-0.3	-0.9	1.0	2.0	1.0	-0.65

(表 2) 2%농축핵연료노심에서의 RBMK-1000의 반응도 보이드계수의 수동제어봉과 추가흡수봉에 대한 의존관계

	Variant no.							
	1	2	3	4	5	6	7	8
No. of manual control rods	30	45	45	45	45	55	30	30
No. of additional absorbers	0	0	30	60	80	80	80	110
Burn-up (MWd/kg)	22.3	21.6	20.0	18.4	17.3	16.85	-	-
Void coefficient of reactivity (in terms of β per unit of void fraction)	4.5	3.5	0.	1.7	1.0	0.4	2.0	1.1

도가 증가된 연료를 장전하도록 결정되었다.

2.4% 농축핵연료를 장전한 노심속에 적당한 수량의 추가 흡수봉을 사용함으로써(80개까지) 反應度의 보이드係數를 보이드 fraction 단위당 1β보다 작은 값까지 감소시킬 수 있다. 더우기 炉心을 2.4% 농축핵연료와 80개의 추가 흡수봉으로 장전하면 중전의 운전조건하에서 연료의 연소를 2% 농축핵연료 연소도의 수배까지 증가시킬 수 있다.

RBMK-1500에 대한 반응도의 보이드계수를 더욱 더 감소시키기 위하여 발전소 시설용량의 감소, 연소도의 변경 및 核燃料再裝填時 흡수봉의 배열 변경에 대한 가능성이 시험중에 있다.

黑鉛使用量の減少

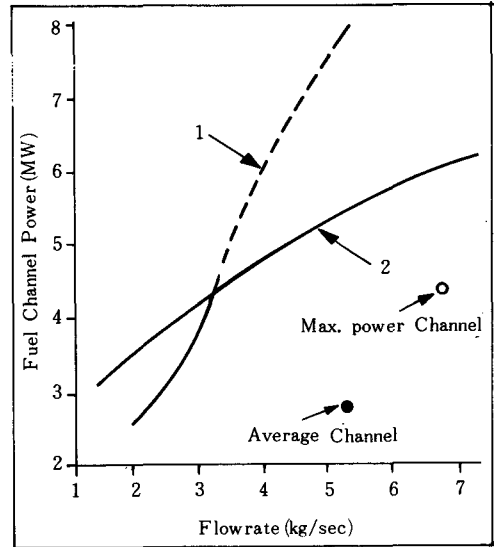
建設中인 원자로에 대해 노심속에 있는 흑연의 양을 감소시킴으로써, 특히 흑연블록 상단의 리브(rib)를 절단함으로써, 특히 反應度의 보이드係數를 줄이려는 가능성이 시험되어 왔다. 이러한 방법으로 노심속에 있는 감속재의 양을 감소시키면 Active Zone에 있는 채널의 기하학적 간격을 변경시키지 않고도 요구되는 낮은 반응도의 보이드계수를 얻을 수 있으며, 새로 장전한 연료채널의 초기출력을 감소시키고, 연료주기에서 U-238의 준위를 증가시킨다.

또한 炉心の 유닛셀에 있는 흑연량에 의한 연소의 感度는 크지 않다.

設計의 安全性

原子炉 設計에 관해서 체르노빌사고는 인간의 잘못과 규제 위반이 심각한 사태를 야기시킬 수 있다는 교훈을 보여주고 있다.

RBMK를 설계하는 과정에서 사고를 유발하는 사건들의 체크리스트가 작성되었다. 최근 이 체크리스트는 상당히 개정되었으며, 체르노빌사고의 분석에 근거한 새로운 시나리오로 보완되



〈그림 2〉 RBMK-1500의 열수력안정한계 (1)와 임계열속(2)

었다. 이 체크리스트는 50개 이상의 항목으로 되어있는데, 7개의 제목으로 구분할 수 있다. 즉, 반응도의 변경과 제어 및 보호시스템의 운전 조건; 냉각재 공급의 고장; 배관계통의 파열; 장비고장 또는 오작동; 연료취급중 긴급사태 발생과 기타 사고(화재, 침수 등). 그리고 가상사고의 평가는 긴급조치를 위한 계획을 개발하는데 필수적이다(최대가상사고는 Drum Separator의 파열로 사료된다).

현재 해결하여야 할 주요문제는 최대가상사고의 경우에 있어서도 방사능이 발전소내에 국한되거나 또는 방사능 누출이 제한된 지역에만 국한되는 것을 보증하기 위한 기술적, 조직적 방법의 개발이다. 이와 같은 문제들을 해결하기 위한 노력이 현재 소련에서 개발중인 “개선된 채널형 원자로”(an Improved Channel Reactor)에 기울여지고 있다.

기존의 RBMK 설계에 대한 최대 설계사고는 전력공급의 동시 차단과 함께 주순환 펌프에서 주변이 완전히 파열되는 것으로 고려되고 있다. RBMK-1000과 비교하여 RBMK-1500의 긴급냉각장치는 상당히 개량되어 성능향상이 도

〈表 3〉 핵연료농축에 대한 RBMK - 1000 주요특성의 의존관계

	Initial enrichment											
	2 %	2.4 %	3 %	2 %	2.4 %	3 %	2 %	2.4 %	3 %	2 %	2.4 %	3 %
No. of additional absorbers in core 0	0	0	0	30	30	30	80	80	80	110	110	110
Void coefficient of reactivity (in terms of β per unit of void fraction)	4.5	3.2	1.3	3.4	2.1	0.2	1.6	0.2	-1.5	0	-2.6	-5.1
Fuel burn-up (MWd/kg)	22.3	28.8	37.6	20.7	27.1	36.0	18.0	24.5	33.4	16.3	22.7	31.6
Maximum linear power rating (W/cm)	315	350	390	305	340	380	285	320	360	270	300	340

모되었으며, 특히 안전주입탱크의 용량이 증가되었다.

RBMK - 1500에서 사용된 사고위치 측정장치 또한 RBMK - 1000에 사용된 것과 다르다. 사고위치측정장치가 별도의 건물에 설치된다. 이 장치는 우발적으로 유출된 증기를 응축하고, 응축되지 않은 방사성가스를 보관한다. 이 장치는 냉수가 공급되는 풀형의 "bubbler"를 가지고 있으며, 그 안으로 증기기체혼합물이 흐른다. 증기집기 챔버아래에는 공기와 응축되지 않은 가스의 보관을 위한 챔버가 있고, 이 챔버에서 가스는 여과장치를 통해 방출될 수 있다.

信 賴 性

RBMK原子炉를 운전하는데 있어 연료채널의 성능은 대체로 양호하다. 1985년에 가동중인 발전소내에 23,473개 연료채널과 2,994개 원자로제어장치채널 및 2,184개의 반사체 냉각채널이 있었으며, 그 해에 7개 연료채널과 2개의 반사체냉각채널이 교체되었는데 이들 9개채널중에서 2개는 10년간 운전후 材質研究를 위한 계획된 제거였으며, 6개는 누설밀봉에 결함이 있었기 때문이며, 1개는 운전정지 기간중 원자로 검사후 제거되었다. 23,000개 이상의 지르코늄 채널과 그에 상응하는 46,000개 지르코늄강 Transition Joint (확산식 용접을 사용하여 제조됨)가 14基의 RBMK 發電所에서 總 90 原子炉·年 운전되었다.

Ignalina RBMK - 1500발전소로 부터 방출되

는 年間 放射能의 量은 허용치 보다 현저하게 낮았다. 1986년의 실적(Ci/year)은 다음과 같다.

가스	방사성핵종		요드-131
	단기	장기	
86,000 (275,000)	4.7 (110)	0.3 (8.2)	4.2 (5.5)
(※괄호안은 허용치)			

Ignalina가 운전을 시작한 이래 현재까지 토양에서 放射性核種의 축적은 탐지되지 않고 있다 (통제구역을 벗어난 지역에서 채취한 샘플로 측정감도: $\sim 5 \times 10^{-11}$ Ci/Sample, 측정시간 10³分). Ignalina발전소의 냉각수조에 대한 정기 모니터링에서도 방사성핵종의 존재는 탐지되지 않았다.

임계열속의 여유를 유지하기 위하여 RBMK-1500의 연료집합체에는 열교환강화기가 부착되었으며, 운전에서의 健全性を 확인하고 열수력 불안정문제를 파악하고자 광범위한 시험(전기열에 의한 Mock ups and Test Loop로)을 수행하였다.

RBMK - 1000 발전소의 선형핵연료 열발생율(평균 146W/cm, 최대 330W/cm)과 RBMK - 1500의 선형핵연료열발생율(평균 221W/cm, 최대 485W/cm)이 서방세계에 가동중인 많은 발전소보다 더 낮은 것을 알았으며 또한 RBMK-1000과 RBMK - 1500 모두 임계열속과 열수력불안정에 대해 상당한 여유가 있음도 확인하였다.