

## 《기술보고》

# 가압경수로의 반응도조절용 B-10 농축붕산 사용에 관한 기술현황분석

김은기 · 이창규 · 서영남 · 배운영 · 전관식

한국원자력연구소

(1995. 2. 21 접수)

## 요 약

가압경수로에서는 장기적인 반응도 조절을 위하여 B-10과 B-11을 함유한 천연붕산을 사용한다. 천연 붕산의 사용으로 원자로냉각재의 붕소농도가 높기 때문에 pH를 적절한 범위로 유지하기 위하여 많은 양의 수산화리튬이 주입된다. 이로 인한 높은 리튬농도는 증기발생기 재료의 응력부식균열과 핵연료피복재의 산화를 촉진시키는 등의 부작용을 초래할 수 있다고 보고되었다. 따라서 본 고에서는 천연붕산을 B-10 함량이 높은 농축붕산으로 대체하는 경우에 대한 기술적, 경제적 영향을 조사하고 검토하였다. 조사 결과, 농축붕산은 원전의 일차계통 수질화학, 부식생성물의 방사화에 의한 선량율, 보조계통 설계, 액체폐기물 발생량 관점에서 여러가지 이점이 있을 수 있으며, 노심설계, 안전해석, 발전소 인허가 등의 관점에서는 문제가 없다고 밝혀졌다. 현재 천연붕산으로 운전중인 원전에서는 농축붕산의 경제성이 발전소의 주어진 제반여건에 의존하고, 농축붕산의 가격에 따라 크게 차이가 있는 것으로 보고되었다. 국내에 신규 원전이 계속적으로 건설되고 있는 현실에 비추어 볼 때, 발전소의 경제성과 안전성을 향상시키기 위하여 농축붕산 사용에 대한 타당성을 좀 더 면밀히 분석할 필요가 있다고 판단된다.

## 1. 서 론

가압경수로에서의 반응도는 반응도조절봉(control rod)과 수용성 붕산( $H_3BO_3$ )에 의하여 조절된다. 열중성자를 흡수하여 반응도를 조절하는 기능은 이러한 두가지의 반응도조절 수단 사이에 경제적인 방향으로 분담된다. 일반적으로 반응도조절봉은 급격한 반응도 변화 기능을 담당하고, 붕산은 핵연료 연소에 따른 장기적인 반응도 변화와 같이 완만한 반응도 변화를 보상한다.

붕소 동위원소중 B-10은 열중성자 흡수 단면적이 3815 barns으로 상당히 크며, B-11은 0.005 barns으로 흡수 단면적이 너무 낮기 때문에 근본적으로 반응도 조절기능이 없지만, 현재 발전소에서는 20 atom%의 B-10과 80 atom%의 B-11을 함유한 천연 붕산을 사용한다[1]. 따라서 원자로냉각재의 천연붕산 농도는 B-10 농축붕산을 사용할 경우에 반응도제어를 위하여 필요한 값에 비하여 5배로 높게 유

지되고 있다. 이렇게 높은 붕산농도로 말미암아 일차계통에서 적절한 pH를 유지하기 위하여 많은 양의 수산화리튬(LiOH)을 주입하여야 하고, 그 결과 높은 농도의 리튬은 지르칼로이 표면에 산화막 형성과, 증기발생기 튜브의 응력부식균열을 초래할 수 있기 때문에 대부분의 발전소들은 부식생성물로 인한 방사선 준위 저감에 효과적인 고 pH 운전 방식으로의 전환을 꺼리고 있다. 따라서 B-10이 농축된 붕산을 사용한다면 원자로 냉각재의 붕산농도를 낮출 수 있고, 그에 따라 수산화리튬 농도를 저하시킬 수 있으므로 고 pH 운전을 가능하게 할 것이다.

또한 현재 액체폐기물의 증발농축시 붕산농도가 농축비의 제한인자로 작용하고 있다. 농축붕산을 사용하면 액체폐기물의 붕소농도가 낮아지기 때문에 농축비를 높여서 농축폐기물의 양을 줄일 수도 있을 것이다.

가압경수로에서 농축붕산을 사용하는 것은 새로운 개념이 아니고, 오래전부터 농축붕산이 바람직한 용해성

독물질로 검토되었으며 때때로 재론되어 왔다. 80년대 말에는 미국에서 천연붕산을 사용중인 웨스팅하우스형 발전소를 대상으로 배관 heat tracing, 탱크 가열기, 단열재 등을 제거할 목적으로 농축붕산의 기술적, 경제적 타당성 검토를 수행한 바 있다[1, 10, 24]. 이러한 농축붕산은 위에서 언급된 여러가지 장점에도 불구하고 천연붕산에 비해 그 가격이 너무 비싸기 때문에 가압경수로에서 사용하지 않고 있지만, 근래에는 농축붕산 생산공정의 개발로 이용성이 증대되고 있다고 판단된다. 최근 ICRP-60에서 원전 작업종사자의 허용 유효선량당량에 5년 평균 20 mSv/yr를 추가하는 등, 보다 강화된 방사선 방호기준에 따라 세계 각국이 ALARA 개념을 철저히 반영, 이행하기 위한 노력을 기울이고 있다. 이와 같은 관점에서 농축붕산의 사용은 ALARA 개념을 실현하기 위한 하나의 방법으로써 검토되어야 하고, 폐기물처분장의 확보에 많은 어려움을 겪고 있는 점과 국내에 신규원전이 계속적으로 건설되고 있는 현실을 감안할 때 이에 대한 기술적 문제점 및 경제성을 분석할 필요성이 대두되고 있다.

본 고에서는 가압경수로에서 천연붕산 대신 농축붕산을 사용할 경우 수질화학 및 ALARA, 핵 설계, 보조계통 설계, 폐기물 처리, B-10 축적기기 등에 미치는 영향을 검토하고 외국에서의 경제성분석 사례를 소개하고자 한다.

## 2. 농축붕산 생산기술

농축붕산은 원자력산업계에서 다양하게 사용되고 있으며, 특히 BWR에서 사고시 반응도 제어용으로 사용되고, 일부 발전소에서는 반응도 조절봉이나 가연성 독물질(burnable poison)로 사용되고 있다.

현재 이러한 농축붕산을 생산하는 업체는 독일의 Eagle-Picher Industries사와 영국의 Centronics사 등이다. Eagle-Picher Industries사는 30년이상 B-10 농축붕소 화학제품을 개발, 생산해오고 있으며, 현재는 99% 이상의 B-10 농축붕소제품을 생산하는 기술을 보유하고 있다[2]. 그림 1은 미국 Quapaw소재 생산시설에서 생산하는 여러가지의 농축붕소 화학제품과 생산공정을 보여준 것이다. 이 밖에도 인도, 브라질, 일본 등지에서는 ion exchange, ion exchange chromatography 등에 의한 B-10의 농축기술을 개발하고 있으며 [3-6], 미국, 영국 등에서는 레이저에 의한 붕소동위원

소 분리기술을 개발하고 있다[7, 8].

Eagle-Picher사가 생산하고 있는 농축붕산은 상당히 고순도로써 원자력발전소에서 요구하는 사양보다 불순물이 훨씬 낮기 때문에 품질측면에서는 순도를 만족하고 있다[9]. 표 1에서 비교한 바와 같이 Eagle-Picher사 제품의 농축붕산은 Westinghouse와 ABB-CE의 붕산 사양상의 불순물 허용값을 모두 만족한다.

농축붕산 가격은 2.00-3.20 달러/gram B-10이고 천연붕산 가격은 0.013 달러/gram B이므로 두 가지의 붕산가격을 비교하기 위하여 같은 양의 B-10기준으로 계산하면 농축붕산 가격은 천연붕산의 50배 정도임을 알 수 있다. 따라서 농축붕산으로 전환하는 경우에는 저렴한 가격의 농축붕산을 안정적으로 공급받는 것이 경제성에 중요한 영향을 미칠 것이다[10].

## 3. 농축붕산 사용상의 기술성

### 3.1. 수질화학 및 ALARA

일차계통에서의 높은 방사선량율은 때때로 발전소 보수작업을 어렵게 한다. 특히, 증기발생기 튜브 plugging이나 sleeving 작업시 channel head의 높은 선량율은 지장을 초래한다. 따라서 방사선량율을 낮추기 위하여 여러가지 방법이 시도되었으며, 이중 하나가 냉각재의 수질화학 조절법이다.

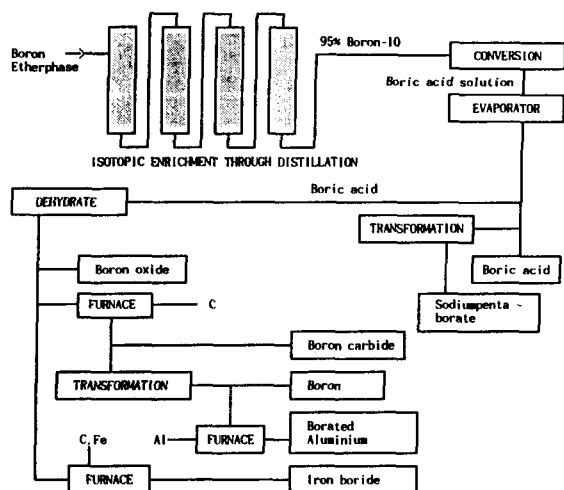


그림 1. Eagle-Picher사의 농축붕산 생산공정과 화학제품 [2]

표 1. ABB-CE사와 Westinghouse사의 천연붕산 사양과 Eagle-Picher사 농축붕산 제품 사양과의 비교

Characteristic	ABB-CE Spec for Natural Boric Acid	W Spec for Natural Boric Acid	Eagle-Picher Data Enriched Boric Acid
H <sub>2</sub> O Insol.	< 50 ppm	< 50 ppm	< 10 ppm
Cl	< 0.4 ppm	< 0.4 ppm	< 0.26 ppm
SO <sub>4</sub>	< 6 ppm	< 6 ppm	< 0.26 ppm
PO <sub>4</sub>	—	< 30 ppm	< 0.1 ppm
Heavy Metal	< 2 ppm	< 2 ppm	< 0.58 ppm
Fe	< 2 ppm	< 2 ppm	< 2 ppm
Ca	—	< 50 ppm	< 1 ppm
As	—	< 2 ppm	< 0.5 ppm
Na	< 10 ppm	< 30 ppm	< 3 ppm
F	< 5 ppm	< 2 ppm	< 0.3 ppm
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	> 99.9%	> 99.9%	> 99.96%

노심외부의 방사선준위는 부식생성물이 일차계통내에서 이동하는 거동에 따라 결정된다. 즉, 부식생성물은 일차계통내에서 침식, 용해, 침적의 과정을 거치면서 운반되며, 노심에서 체재하는 시간이 증가할수록 방사화하는 양이 증가한다. 이러한 부식생성물의 이동은 원자로냉각재의 pH와 온도의 함수인 용해도에 의하여 지배된다. 그림 2에서 보여준 바와 같이 과거에는 부식생성물의 주성분이 magnetite인 것으로 판단하여 이에 대한 방사화 억제제를 위하여 magnetite의 용해 조건인 6.9 정도의 낮은 pH로 유지하였지만 부식생성물의 주성분

이 nickel ferrite로 밝혀진 후에는 nickel ferrite가 용해되는 높은 pH 조건을 유지함으로써 노심에 침적되어 방사화되는 양을 최소화시키고 있다[13]. 철을 함유한 부식생성물은 주로 nickel ferrite ( $\text{Ni}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ ) 또는 nickel-chromium ferrite ( $\text{Ni}_x\text{Cr}_y\text{Fe}_{3-x-y}\text{O}_4$ ) 형태로 존재한다[11, 12]. 이러한 부식생성물은 운전온도에서의 pH가 7.4이상이면 온도에 따른 용해도 변화율이 양(+)이 되어 부식생성물은 온도가 높을수록 용해성이 더 커진다. 이때 부식생성물은 노심에 침적하지 않고, 온도가 낮은 증기발생기 지역으로 이동, 침적하게 되어 부식생성물을 노심외부에 체류하게 함으로써 방사선 준위를 최소화할 수 있다. 따라서 만일 발전소가 pH 7.4에서 운전된다면 현재의 연평균 피폭율인 650 man-rem/year(그림 3)에서 100 man-rem/year 가

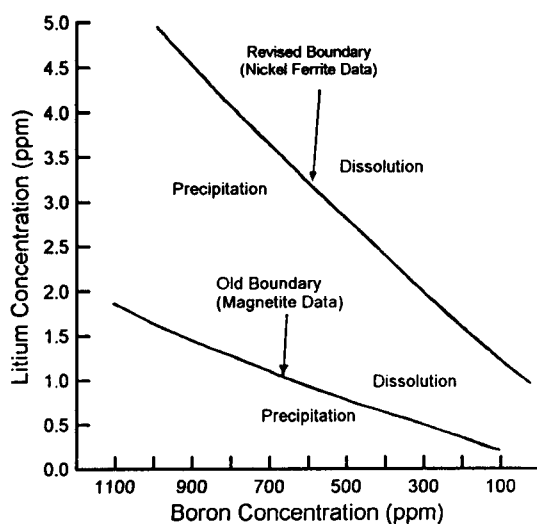
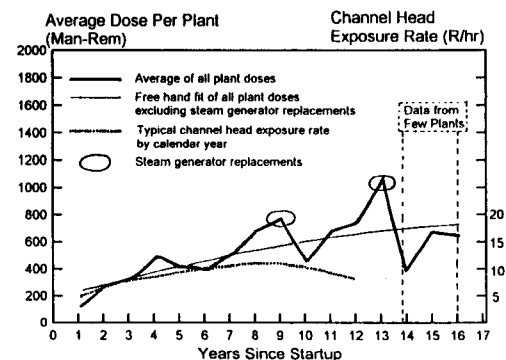
그림 2. 285°C, 25 cc H<sub>2</sub>/ kg H<sub>2</sub>O 조건에서 철 산화물의 용해에 대한 리튬과 붕소 농도의 영향

그림 3. 발전소 운전 년수에 따른 NRC 직업상 방사선 피폭율과 증기발생기 Channel Head 선량률 [24]

량을 줄일 수 있을 것으로 평가되었다[1].

이러한 부식생성물의 용해도에 근거하여 냉각재의 pH를 7.4로 유지하는 고 pH 운전(최대 리튬농도를 3.5 ppm으로 제한)이 스웨덴의 Ringhals Units 2, 3, 4와 미국의 Calvert Cliffs Unit 2, Millstone Point 3, Doel Units 3, 4 등의 발전소에서 시도되었다. 그 결과, 그림 4[14]에 보여진 바와 같이 상승하던 방사선량을 중지시키거나, 저감시키는 경향을 보였다[15-18]. 그러나 리튬농도를 2.2 ppm 이상으로 유지하는 고 pH 운전을 시도하였던 발전소들은 지르칼로이 핵연료 표면에 산화물이 과도하게 성장하고, Alloy 600의 일차측에 응력부식균열을 일으키기 때문에 현재 고농도의 리튬운전을 중단한 것으로 알려졌다.

이와 같이, 방사선량을 낮추기 위하여 원자로 냉각재의 수질화학적 조건을 약알칼리성으로 유지하는 것이 바람직하지만, 리튬농도의 증가는 지르칼로이의 부식을 촉진시키고, 증기발생기 튜브재질인 Alloy 600의 일차계통수 응력부식균열(Primary Water Stress Corrosion Cracking)을 유발할 수 있기 때문에 현재 영광 3, 4호기를 비롯한 대부분의 국내 발전소도 붕소농도의 변화에 따라 최고 리튬농도 2.2 ppm의 제한하에 pH를 6.9-7.4 범위내에서 조절하는 방법으로 운전하고 있으며 고 pH 운전으로의 전환을 유보하고 있다.

그림 5는 pH 7.4의 elevated pH control scheme과 최대 리튬농도를 2.2 ppm으로 제한하는 coordinated pH control scheme에 대한 리튬과 붕소 농도의 상관관계를 보여준다[2, 19]. 여기서 보여준 바와 같이 60% B-10으로 농축된 붕산을 사용한다면 핵연료 주기 전기간을 통하여 2.2 ppm의 리튬농도를 초과하지 않고 pH 7.4의 고 pH 운전이 가능함을 알 수 있다.

따라서 농축붕소를 사용하여 원자로냉각재의 붕소농도가 낮아지면 원하는 pH를 유지하기 위한 수산화리튬의 주입량도 감소하므로 수산화리튬 소모량을 줄일 수 있다. 또한, 일차계통에서 부식생성물의 주성분인 nickel ferrite의 침전 감소로 방사화량도 상당히 감소하고 보조계통의 방사선준위에도 영향을 미치게 되므로 작업자의 총피폭을 줄일 수 있을 것이다.

### 3.2. 붕소농도 측정

원자로냉각재의 붕소농도를 측정하기 위하여 많은 발전소에서 적정법을 이용하고 있다. 이 적정법은 일반적

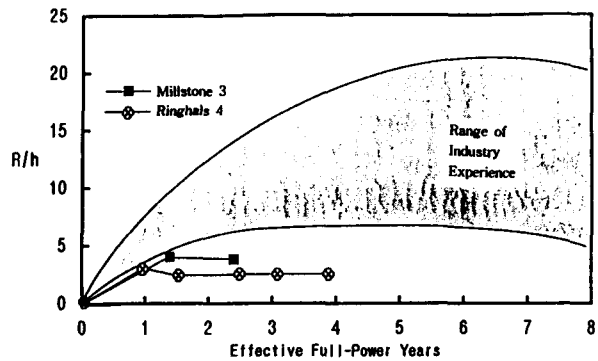


그림 4. Westinghouse 발전소의 증기발생기 Channel Head 선량률[14]

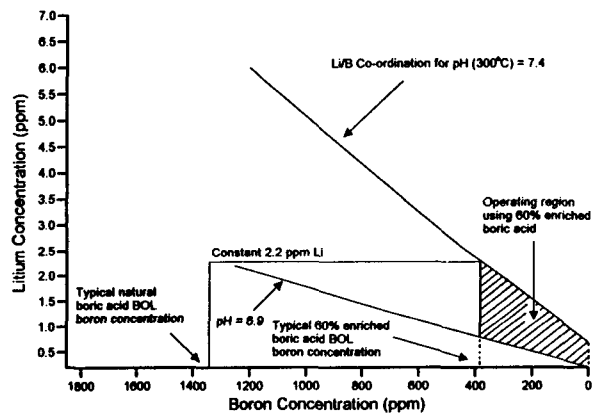


그림 5. 농축붕산 사용시의 pH 운전 범위[2, 19]

으로 500 ppm 이상의 붕소농도에서 1%, 500 ppm 이하의 붕소농도에서 5 ppm의 부정확도를 가지는 것으로 보고되었으며, 500 ppm 이하의 붕소농도에서 5 ppm의 부정확도는 붕소농도가 낮을수록 상대오차가 더 커지는 것을 의미한다. 또한 지금도 적정법의 측정 부정확성으로 인하여 붕소농도의 측정값과 예측값이 허용 오차를 초과하는 것을 고려하면, 농축붕산을 사용하는 경우에 보다 더 정확한 측정방법이 필요할 것이다.

이러한 측정의 부정확성을 해결할 수 있는 방법으로 총 붕소농도를 측정하지 않고 B-10농도만을 측정하는 중성자 흡수법과 질량 분광법이 제안되었다. 중성자 흡수방식의 붕소농도측정기(Boronmeter)는 일반적으로 신뢰도가 낮아서 적정법보다도 더 부정확한 것으로

알려져 왔으나, Babcock & Wilcox는 0-200 ppm B-10농도범위에서 3 ppm 이하의 부정확도를 가진 on-line 측정기를 개발하였다. 영광 3, 4호기의 붕소농도측정기는 중성자 흡수율에 의하여 B-10 농도를 측정한다. 이 측정기기에 대한 설계사양서상에서는 ( $\pm 2\%$  of reading)  $\pm 5$  ppm의 정확도를 요구하고 있으며 실제 설치된 측정기기의 부정확도는  $\pm 3$  ppm이하로 농축붕산을 사용하더라도 근본적으로 B-10 농축도에 따른 환산만 고려하면 되기 때문에 측정정확도에는 거의 영향을 미치지 않을 것이다.

또 다른 붕소측정법으로 그림 6[1, 2]에 보여진 바와 같이 B-10의 중성자 흡수 반응시,  $Li-7$ 이 여기상태로 부터 기저상태로 전이될 때 방출되는 0.477 MeV의 감마선을 측정하는 기법이 0.02 microgram B-10정도의 정확도를 가지므로 요구되는 정확도를 만족시킬 수 있을 것으로 보고되었다[2, 8]. AECL은 위와 같은 중성자 조사법을 이용하여 신뢰도 높은 운반형 B-10 측정장치를 개발하였다. 이 측정장치에는 감속재 역할을 하는 중수를 원통형 탱크에 담고 그 안에 열중성자를 발생시키기 위한 Cf-252 선원을 설치하였다. 0-5 ppm의 B-10 농도범위에서 측정가능한 이 분석기는 0.5 ppm 이하에서  $\pm 0.025$  ppm, 0.5 ppm 이상에서  $\pm 5\%$ 의 정확도를 가진다[20, 21].

중성자의 투과율 측정법을 이용하는 servo-driven neutron-absorbing sleeve를 장착한 novel null-type boronometer도 개발되었으며, 시험결과 B-10 농도를 신속, 정확하게 on-line으로 측정할 수 있음을 보였다[22].

다소 정확도가 떨어지는 측정기법에는  $^{10}B(n, \alpha)^7Li$  반응시 방출되는 알파입자수를 측정하는 방법이 있다.

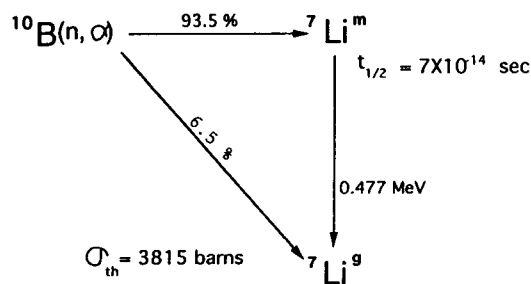


그림 6. 열중성자를 이용한 B-10 농도 측정[1, 2]

또한 간단하고 저렴한 선택적 질량측정기를 이용하는 가스크로마토그래프가 상용으로 판매되고 있으며, 이 방법으로 붕소가스화합물의 B-10 농축도를 신속, 정확하게 측정할 수 있다[2, 9]. 이 밖에도 고주파 유도 plasma 원자발광분석법과 manitol titration 분석법이 이용되고 있다[22, 23].

### 3.3. 노심 설계

서론에서 언급한 바와 같이 붕산중 B-10 성분이 B-11보다 중성자 흡수단면적이 매우 크므로 B-11의 수밀도는 무시할 수 있는 정도이다. 따라서 노심 핵설계시 감속재내의 붕산중에서 B-10의 수밀도가 중요하다. 특히 B-10 수밀도가 높을수록 감속재온도계수 (Moderator Temperature Coefficient)가 커지게 되므로, 다량의 B-10이 감속재내에 존재할 경우에는 감속재온도계수가 양의 값을 갖게 되어 원자로의 안전성 유지가 어려워진다. 따라서 원자로의 안전성을 보장하기 위하여 감속재내 B-10의 양을 제한시켜야 한다.

B-10의 농축도를 증가시키면 감속재내의 B-10 수밀도를 증가시키나, 노심내의 반응도를 제어하기 위한 붕산농도 역시 감소하게 되므로 농축붕소를 사용하더라도 B-10의 수밀도에는 변화가 없게 된다. 따라서 농축붕소를 사용하더라도 감속재온도계수에 미치는 영향은 거의 없다. 이러한 현상은 boron worth에 대해서도 똑같이 적용된다. 즉, 농축붕소를 사용하면 boron worth는 커지나, 노심내 붕산농도가 낮아지므로 총 반응도는 같게 된다.

### 3.4. 핵연료 주기

최근의 동향은 전력회사가 경제성을 높이기 위하여 24개월 주기의 장주기 핵연료 채택을 원하며, 이 경우 현재의 설비는 18개월 주기로 붕산농도의 제한값에 도달하게 되어 추가적인 반응도 조절, 즉 더 높은 붕산농도 유지가 필요하다. 이렇게 높은 붕산농도는 발전소 붕소조절계통의 물리적 변경을 필요로 할 수 있다. 예를 들면 붕산수 저장탱크의 용량증대, 붕산석출을 방지하기 위한 가열 및 보온 설비가 추가로 필요하고, 기기 부식율의 상승을 초래할 것이다. 따라서 붕산농도 제한값을 초과하지 않기 위해서는 농축붕소의 사용이 필수적일 수 있으며, 경우에 따라서는 계통설계 변경없이 장주

기 운전이 가능할 수도 있을 것이다.

따라서 Battaglia와 Roesmer는 농축붕산을 사용하면 각 발전소 설계특성에 따라 장주기로의 핵연료주기 변환시 야기되는 붕산농도에 따른 장애 요소를 배제할 수 있다고 보고하였다[1].

### 3.5. 안전 해석

가동중인 발전소를 천연붕산과 동일한 반응도 조절효과를 가지도록 농축붕산으로 전환한다면, 안전성에 대한 재해석은 필요하지 않을 것이다. 다만 붕산희석사고나 안전주입계통의 작동을 필요로 하는 사고 등에 대한 안전해석 기술내용이나 Tech. Spec.은 원래 설계기준으로 사용된 천연붕산과 동일한 중성자 흡수능에 상당하는 농축붕산 농도와 반응도 값(boron worth)을 반영하여 개정해야 할 것이다.

붕산주입 속도는 이미 상당히 빠르기 때문에 이 관점에서는 큰 이점이 없지만, 붕산농도가 낮아지기 때문에 LOCA 발생시 붕산석출의 방지를 위한 저온관으로 부터 고온관 순환으로 전환하는 시간이 상당히 지연될 것이다. 이 전환시기는 잔열 부하, 원자로냉각재계통, 재장전수저장탱크, 비상노심냉각계통의 붕소농도, 사고 후 원자로냉각재계통의 냉각재량을 고려하여 결정되며, 특히 사고전의 재장전수저장탱크의 붕소농도에 영향받는다. 그러므로 비상노심냉각계통의 설계특성에 따라 고온관으로의 전환요건 제거가 가능할 수 있으며 이에 대한 농축붕산의 영향이 검토되어야 할 것이다.

또한 핵납융기 살수시 pH의 변화에 따른 방사능에 대한 영향은 3.8절에 기술되어 있다.

### 3.6. 보조계통

농축붕산 사용시에는 원자로냉각재의 붕산농도를 조절하는 기능을 가진 화학 및 체적제어계통의 설계가 전반적으로 검토되어야 할 것이다.

특히 붕산혼합탱크, 재장전수저장탱크의 붕산농도의 저하 또는 용량 감소가 가능해 질 것이다. Westinghouse형 발전소는 붕산저장탱크의 붕산농도가 7.0-8.5 wt%로 높기 때문에 붕산석출을 방지하도록 설계되어 있다. 따라서 농축붕산을 사용함으로써 붕산계통의 붕산농도를 2.5 wt% 이하로 낮출 수 있다면 상온에서도 붕산석출을 방지할 수 있으므로 heat tracing

설비가 불필요하고, 붕산보충펌프의 밀봉재 수명을 연장시켜 줄 수 있을 것으로 기대된다.

원자로냉각재의 붕산농도가 낮아짐에 따라, 핵연료 연소를 보상하기 위한 정 반응도 주입(feed & bleed에 의한 보충수주입) 운전이나 원자로를 정지시키기 위한 부 반응도 주입(붕산주입)시 생성되는 원자로 냉각재 폐기물량을 감소시켜서 붕산재생계통의 처리량을 감소시킬 것이다.

농축붕산 가격이 비싸기 때문에 일차계통으로부터의 냉각재 누설률 및 붕소재생계통에서의 붕산회수율이 경제성 확보에 중요한 변수이다. 따라서 기기, 밸브 등으로부터의 누설냉각재를 최대한 회수할 수 있도록 설계하고 붕소재생계통에서의 붕산회수율을 향상시키기 위하여 방사성 물질의 제거 효율을 높일 수 있도록 설계하여야 할 것이다. 또한 ABB-CE형 화학 및 체적제어계통은 붕소농도가 30 ppm 이하의 핵연료 주기말에서 붕소제거이온교환기를 이용하여 붕소를 제거하고 이온교환수지를 폐기하기 때문에 이로 인한 붕소 소모량 평가와 더불어 핵연료 주기말의 붕소희석운전을 위한 설계 개선 필요성에 대한 분석이 수행되어야 한다.

### 3.7. 인허가

Rodill은 Surry 발전소를 농축붕산 사용으로 전환시 인허가상의 문제점을 조사하였다[10]. 농축붕산으로 대체시 발전소 기술지침서(Tech Spec)의 변경이 필요하며 인허가기관의 승인을 득해야 하고, 인허가와 관련된 사항은 (1) B-10 측정 부정확도 (2) 두 호기 동시 전환 또는 점진적 전환등 전환문제 (3) 사용후 핵연료 저장조 (4) 안전해석 및 재장전 노심설계 (5) 발전소 운전 및 보수에 대한 영향 등이라고 보고하였다. 특히 B-10 측정기기의 부정확성이 해결된다면 인허가상의 큰 문제는 없다고 결론지었다.

### 3.8. 기기 환경검증

농축붕산을 사용한다면 원자로냉각재의 붕산농도가 낮아지기 때문에 원자로냉각재계통의 pH운전 범위를 좁힐 수 있을 것이다. 예를 들면 영광 3, 4호기 원자로냉각재의 설계 pH범위는 3.8-10.6이지만 80% B-10 농축붕산을 사용한다면 설계 pH범위가 5.0-10.6으로 좁아진다. 이와 같이 붕소농도와 수산화리튬 농도의 저하

에 따른 완화된 화학조건으로 인하여 외부로의 냉각재 누설시에는 기기 손상률이 낮아지고, 궁극적으로는 발전소 수명 연장에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

또한 LOCA후 방사성 요오드를 효과적으로 제거하기 위하여 격납용기 살수용액에 주입되는 화학첨가제인 NaOH, Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> 등의 주입량을 줄이면 기기환경 검증에 사용된 pH가 변경되지 않으므로 재 환경검증의 필요성이 없어지고 LOCA에 의한 소외 방사능 누출량에 대한 영향을 배제할 수 있을 것이다.

### 3.9. 액체폐기물 처리

액체폐기물은 부피를 줄이기 위하여 농축하여 폐기된다. 이때 농축비는 붕산농도에 의하여 제한받는데, 일반

적으로 17 wt%의 붕산농도를 농축기준으로 정하고 있다. 농축붕산을 사용하면 원자로냉각재의 붕산농도가 낮아지기 때문에, 폐기물의 농축비도 B-10 함량증가를 만큼 높일 수 있을 것이다. 최종적으로는 액체폐기물을 농축, 고화시킨 고체폐기물량의 감소에도 기여할 것으로 판단된다. 따라서 이는 폐기물저장시설 크기를 감축시키는 효과가 있으므로 이에 대한 경제성 평가도 수행되어야 할 것이다.

## 4. 경제성분석 사례

현재 천연붕산으로 운전중인 미국의 몇개 발전소는 농축붕산으로의 전환에 대한 기술적, 경제적 타당성 조사를 수행한 바 있다. 여기서는 그 경제성 분석 사례를 소개하고자 한다.

표 2. Battaglia와 Roesmer의 농축붕산으로 전환에 대한 경제성분석 결과[1]

	Operating Plant Benefit	Probability of Association with EBA Utilization	Estimated Annual Savings, \$		
			2-Loop	3-Loop	4-Loop
1.	Extended Fuel Cycle (18 to 24 months)	0.1	130,000	200,000	270,000
2.	Lower Radiation Exposure (save 100 man-rem /yr)	0.5	500,000	500,000	500,000
		1.0	1,000,000	1,000,000	1,000,000
3.	Power Increase (1% Uprating)	*	0	0	0
4.	Reduced Steam Generator Maintenance	0.1	800,000	800,000	800,000
5.	Lower Lithium Costs	1.0	58,000	88,000	112,000
6.	Reduced Solid Waste	1.0	38,000	38,000	38,000
7.	Heat Tracing Maintenance	1.0	100,000	100,000	100,000
8.	Improve Nuclear Safety	*	0	0	0
9.	Extend Plant Life	*	0	0	0
Total Annual Savings			1,626,000	1,726,000	1,820,000
			to	to	to
			2,126,000	2,226,000	2,320,000

\* 예상 이득을 고려하지 않았음.

#### 4.1. Westinghouse사

특정 발전소가 아닌 일반적인 가압경수로를 대상으로 농축붕산으로의 전환을 검토한 Battaglia와 Roesmer는 원자력발전소의 경제성에 영향을 미치는 요인은 발전소마다 다양하기 때문에 농축붕산으로 전환에 대한 타당성은 발전소마다 다르며, 특히 발전소 용량, 같은 발전소 부지내의 발전소 호기수, 위치, 잔여수명, 붕소 조절계통의 붕산농도, 붕소재생계통의 유무, 일차계통으로부터의 액체폐기물 생성량, 운영비 절감효과, 발전소계통의 설계변경 필요성등에 달렸다고 보고하였다[1]. 이러한 인자들로 부터 핵연료 비용 절감, 보수유지 비용절감, 붕산저장탱크의 확장등 설계변경의 필요성에 미치는 농축붕산의 기여도를 평가함으로써 경제적 타당성을 평가하였다. 이 평가에서는 붕소재생계통이 운전되고 있거나, 현재 사용되고 있지 않더라도 운전시에는 운전비용 상승이 붕산보충 비용이나, 폐기물 처리비용 감소효과와 상쇄된다고 가정하였다. 또한 붕산저장탱크에서 heat tracing을 필요로 하지 않으며, 핵연료주기를 늘일 경우에 붕소농도 증가에 따른 여유도를 감안하여 75 atom%의 농축도를 기준으로 선정하였다. 초기 투자비용은 초기충전시 농축붕산 비용과 기존의 천연붕산 처리비용등 실제 전환 작업에 따른 비용의 합이다. 운전비용 상승은 폐기물처리계통을 통하여 버려지는 농축붕산의 보충 비용이다. 또한 농축붕산 사용에 따른 비용절감효과를 기여도에 대한 확률을 가정하여 산출한 결과를 표 2에 실었다.

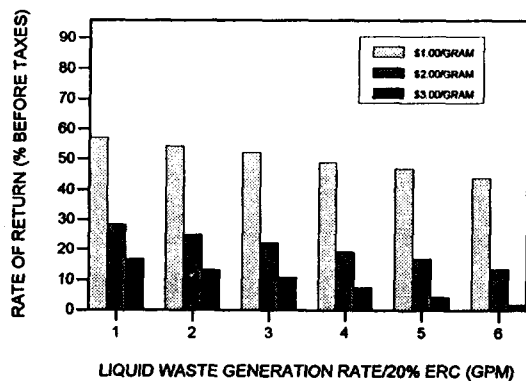


그림 7. 연간 투자회수율에 대한 액체폐기물 발생량과 농축붕산 가격의 영향[1]

30년의 잔여수명이 있는 발전소에 대하여 위에서 언급된 전환시 추가비용과 전환에 따른 비용절감효과를 고려한 투자회수율을 그림 7에 나타내었다.

#### 4.2. Surry 발전소 1, 2호기

천연붕산을 사용하고 있는 미국 Surry 발전소 1, 2호기에서는 농축붕산으로 전환시

- (1) 많은 문제점이 있는 붕소재생계통을 광범위하게 수리하여 붕산을 재생사용하는 경우와
- (2) 붕소재생계통을 수리하지 않고 사용된 붕산을 폐기하는 경우

두 경우에 대하여 경제성을 분석하였다(표 3 참조).

농축붕산 사용시 고 pH 운전에 따른 ALARA 절감효과에 대하여 신뢰도를 부여한다면 발전소 잔여수명기간 동안 16,491,000-46,690,000 달러의 이득이 있지만, 이 분석에서는 리튬의 최대 허용농도를 증가시키는 방법으로 고 pH 운전이 가능하다고 가정하여 고 pH 운전에 따른 비용절감을 반영하지 않았다. 결론적으로 Surry 발전소는 (1) 전환시 장기간의 발전소정지 및 많은 노력 소요 (2) 두 호기의 공용설비로 인한 한 호기만의 전환 불가능 (3) 신뢰도 낮은 붕소재생계통 등의 이유로 경제성이 없다고 결론지었다[10].

#### 4.3. EPRI 경제성분석

EPRI의 지원하에 수행된 연구는 심각한 정도의 보수를 필요로 하고 방사선 피폭률이 높은 실제 발전소를 대상으로 농축붕산으로의 전환에 대한 경제성을 분석하였다[24]. 이 발전소는 문제가 있는 붕소재생계통을 보수하기 위한 비용이 5,700,000 달러로 평가되었다. 경제성 분석은 농축붕산으로 전환시 대략 600만 달러의 붕산처리계통 교체비용을 절감할 수도 있다는 경제적 매력을 고려하여 수행되었다. 또한 농축붕산으로 전환하더라도 천연붕산을 재사용할 수 있는 계통기능을 유지하는 것으로 가정하였다. 즉, 붕산석출 방지를 위한 가열설비가 농축붕산에는 필요없지만 천연붕산으로 재전환을 대비하여 설치되었다. 쌍둥이 호기를 다음의 두 가지 경우에 대하여 평가하였다.

- 경우 1 : 붕산계통을 교체하고 농축붕산으로 전환

이 경우는 붕산계통의 교체비용을 투자하여야 하기



표 3. Surry 발전소의 농축붕산 전환에 대한 경제성분석 결과[10]

ITEM	CASE 1		CASE 2	
	WITH RECYCLE	WITHOUT RECYCLE	WITH RECYCLE	WITHOUT RECYCLE
	SAVINGS (\$)	COST (\$)	SAVINGS (\$)	COST (\$)
1. Enriched boric acid for the conversion	-----	5,151,000	-----	5,151,000
2. Repairs to improve reliability of the BR system.	-----	5,000,000	-----	----
3. Treatment of radwaste produced during the conversion	-----	145,000	-----	145,800
4. Cost of demineralized water produced for the conversion	-----	57,200	-----	57,200
5. ICP Mass Spectrometer -initial cost	-----	200,000	-----	200,000
6. ICP Mass Spec. -operating cost over remaining life of Plant	-----	460,000	-----	460,000
7. Other Engineering conversion costs -Licensing Submittal, modifying analytical codes, Design Change preparation, etc.	-----	250,000	-----	250,000
8. Additional boric acid cost over remaining life of the station	-----	7,190,00	-----	67,749,500
9. Extra maintenance and operating cost for BR system and equipment added to cleanup the recycled boric acid over the remaining life of the station.	-----	5,750,00	-----	----
10. Lithium savings in maintaining a higher RCS pH over the remaining life of the plant.	2,002,000	----	1,638,000	----
11. Savings due to the deletion of heat tracing over the remaining life of plant.	1,000,000	----	1,000,000	----
12. Increased fuel cycle length.	0	0	0	0
13. Benefit due to reduced component degradation resulting from system leakages.	0	----	0	----
14. ALARA benefits for operation with a higher RCS pH	0	----	0	----
Total	3,002,000	24,204,400	2,638,000	74,013,500

때문에 농축붕산으로 전환시 이득이 이를 포함한 전체 비용을 상쇄할 수 있어야 한다.

- 경우 2 : 기존의 붕산저장탱크만을 3개의 20,000 gallon 탱크로 교체하고 농축붕산으로 전환  
이 경우는 천연붕산으로 재전환시를 대비하여 6% 까지의 붕산수를 사용할 수 있는 heat tracing 설비를 갖춘 탱크를 설치하는데 2,500,000 달러가 소요되어 실제로 인한 절약효과는 3,200,00 달러로 평가하였다.

가장 큰 이득효과가 있는 방사선 피폭절감을 평가하기 위하여 NRC 분류 범주(정상 유지보수, 가동중 검사, 특별 유지보수, 원자로 운전 및 점검, 폐기물 처리, 재장전)중 처음 3가지 사항만이 고려되었으며, ALARA 이득효과를 5,000 달러/man-rem으로 계산하였다.

이 연구에서는 두 가지의 평가기준을 적용하여 경제적 타당성을 분석하였지만 여기서는 이자 및 세금을 고려하지 않고 총 투자비용을 회수하는데 소요되는 기간으로 정의되는 2년 환수 (2 year payback) 기준을 적

용한 결과를 소개한다. 이 기준은 총 투자비용을 연간 이득으로 나누어 결정된다. 2년 환수를 기준으로 농축도 35%, 50%, 75%에 대한 경제성 분석 결과를 그림 8, 9에 나타내었다. 이 중 경우 2에 대한 상세내역은 표 4에 있다.

이 결과에서 알 수 있듯이 가장 큰 비용은 농축붕산과 붕산계통 보수 비용이며, 가장 큰 이득은 ALARA와 핵연료 관련 사항이다. 결론적으로 2년 환수 기준을 적용하면,

- 경우 1은 경제성이 없고,
- 경우 2는 92 atom% B-10의 가격이 1.00-1.50 달러/gram이 되면 농축붕산으로 대체하는 것이 경제성이 있다고 밝혔다.

#### 4.4. 기 타

이 밖에도 미국의 Zion과 Millstone, 프랑스의 EDF, 영국의 Sizewell B, 일본의 Kansai, 독일의 KKP와

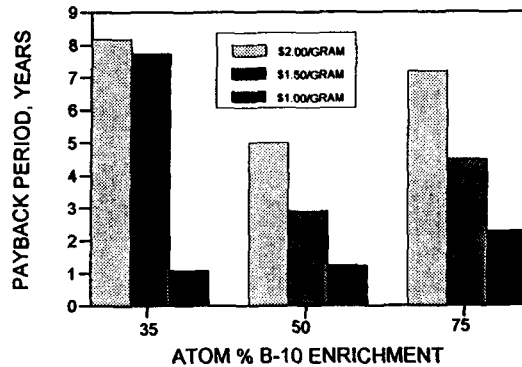


그림 8. 봉산재생계통을 교체하고 농축붕산으로 전환하는 경우(경우 1)에 대한 투자회수기간[24]

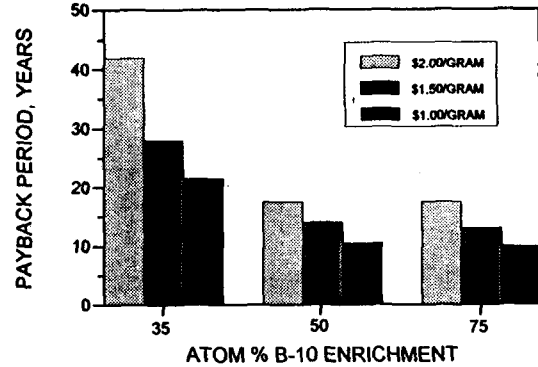


그림 9. 봉산저장탱크만 교체하고 농축붕산으로 전환하는 경우(경우 2)에 대한 투자회수기간[24]

표 4. 농축붕산으로 전환에 대한 EPRI의 경제성분석 결과[24]

FIXED COSTS \$	Cost of Enriched Boron at 92 Atom % B-10		
	\$2 /gram	\$1.50 /gram	\$1 /gram
Enriched Boron	7,557,176	5,667,882	3,778,588
Conversion	112,870	112,870	112,870
Nuc. Safety	40,000	40,000	40,000
Evaporator	1,000,000	1,000,000	1,000,000
Procedure Changes	100,000	100,000	100,000
BARS /Aux. Sys. Modifications	800,000	800,000	800,000
B-10 Analyzer	100,000	100,000	100,000
BAS Replacement	2,500,000	2,500,000	2,500,000
Total Fixed Costs	12,210,046	10,320,752	8,431,458
Base Case Credit	5,700,000	5,700,000	5,700,000
Incremental Investment Over Base Case	6,510,046	4,620,752	2,731,458
INCREMENTAL OPERATING COST INCREASE OVER BASE CASE (\$ /yr)			
EBA to WPS	214,000	160,500	107,000
EB Analyzer Operation	20,000	20,000	20,000
EBSs w /Spent Resin	281,000	210,750	140,500
EBA Burnup Replacement	30,000	22,500	15,000
P.S.Leaks	8,000	6,000	4,000
Evap Operator	50,000	50,000	50,000
BARS Operator	50,000	50,000	50,000
Total Costs (\$ /yr)	653,000	519,750	386,500
ANNUAL BENEFITS (\$ /yr)			
ALARA (\$5,000 /MAN-REM)	985,000	985,000	985,000
Fuel Management	250,000	250,000	250,000
Reduced Lithium	112,000	112,000	112,000
Reduced Natural BA	185,000	185,000	185,000
Total Benefits	1,532,000	1,532,000	1,532,000
Net Annual Benefits	879,000	1,012,250	1,145,500
Payback Period (yrs)	7.4	4.6	2.4

GKN 등의 전력회사는 현재 운전중인 발전소를 대상으로 농축붕산 사용에 대한 타당성을 분석하고 있다[2].

## 5. 결 론

원자력발전소에서 장기적인 반응도 조절 수단으로써 B-10농도가 높은 농축붕산을 사용하면, 기존 발전소에 비하여 많은 이점이 있는 것으로 밝혀졌다.

일차계통의 붕산농도를 낮출 수 있고 이에 따라 수산 화리튬 주입량을 줄일 수 있으므로 고 pH운전의 장애요인으로 인식되고 있는 높은 리튬농도에 의한 지르칼로이의 부식 및 Alloy 600의 응력부식균열이 발생할 가능성이 낮아지므로 고 pH운전이 가능하게 되어, 부식생성물중 nickel ferrite의 침적과 방사화 감소로 작업자 피폭율을 현격히 감소시킬 것으로 기대된다. 또한, 농축붕산의 사용은 원자로냉각재의 붕산농도를 감소시킴으로써 기기의 환경검증 요건을 완화시킬 것이다. 이 밖에도 반응도조절을 위한 feed & bleed 양 감소에 따른 폐기물 생성량 감축, 냉각재의 외부 누설에 의한 기기손상을 감소등 여러가지 이점을 가져 올 것이다.

가동중인 미국의 몇개 발전소에서 농축붕산 사용에 대한 타당성을 검토한 바 있으며, 지금까지의 검토결과에 의하면 기술적으로나 안전상의 인허가 문제는 없는 것으로 분석되었으며, 현재도 미국, 프랑스, 영국, 일본, 독일등의 원자력발전소를 대상으로 농축붕산으로 대체하기 위한 방안을 검토중에 있다.

현재 농축붕산의 가격이 비싼 편이기 때문에 가동중인 발전소에 적용하는 경우는 조건의 제약성 때문에 비경제적일 수 있지만, 점차 농축붕산의 사용에 대한 분위기가 고조되고 있고 생산방법에 대해서도 연구가 활발하게 진행되고 있으므로 농축붕산의 수요와 생산이 증가한다면 곧 농축붕산의 적정 가격이 형성될 것으로 예상된다. 지금보다 농축붕산의 가격이 더 저렴해진다면 농축붕산에 대한 경제성은 향상될 것이며 아울러 사용성도 증대될 것이다.

한편, 가동중인 발전소의 경우는 주어진 제반조건 때문에 제약을 받을 수 밖에 없지만 새로 건설될 발전소의 경우는 농축붕산 사용에 따른 이점을 최대한 반영할 수 있을 것이므로 경제적으로나 기술적으로 더 타당성이 있을 것이라고 예상된다. 나아가서는 국내원전에 장주기 운전이 점차 도입되고 있으며 잔여 수명이 길고 수명 연장까지 고려한다면, 기존 발전소의 농축붕산 사용에

대해서도 안전성뿐만 아니라 경제성이 있을 수도 있을 것이다.

따라서 이에 대한 타당성을 면밀히 분석하고, 그 결과를 발전소 설계단계부터 반영하여 발전소의 안전성과 경제성이 향상될 수 있도록 개선할 필요가 있다고 판단된다.

## 참고문헌

1. J. A. Battaglia and J. Roesmer, "Utilization of Enriched Boric Acid in Pressurized Water Reactor Plants", Proceedings of EPRI Seminar on PWR Primary Water Chemistry and Radiation Field Control, Paper 34 (1988)
2. V. Goehlich and J. Florinski, "Enriched Boric Acid for Pressurized Water Reactors", Proceedings of Conference on Chemistry in Water Reactors, p. 128 (1994)
3. A. B. D'souza and A. S. Sonwalker, "Studies on Separation of Boron Isotopes by Ion Exchange", BARC-1460 (1989)
4. B. K. Sharma and R. Subramanian, "Separation of Boron Isotopes by Ion Exchange Chromatography", Ind. J. Chem., 30, 531 (1991)
5. C.M.M. Coutinho et al., "Enrichment of Boron 10", INIS-BR-2496 (1990)
6. K. Takeda et al., Kagaku-Kogaku-Robunshu, 15, 567 (1989)
7. R.J.Jensen et al., "Method of Separating Boron Isotopes", US Patent Document 4,447, 303/A/(1984)
8. E. J. Lahoda et al., "Process and Apparatus for Isotopic Enrichment", GB Patent Document 2,155,235/A/(1985)
9. V. Goehlich, "Enriched Boron Products", Proceedings of Int. Conference on Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems 6, BNES, p. 187 (1992)
10. W.B. Rodill, "Feasibility Study on Enriched Boron, Surry Power Station, Unit 1 and 2",

- Proceedings of EPRI Seminar on PWR Primary Water Chemistry and Radiation Field Control, Paper 35, March (1988)
11. Y.L. Sandler and R. H. Kunig, *Nucl. Sci. Eng.*, 64, 866 (1977)
  12. Y.L. Sandler and R.H. Kunig, *Nucl. Sci. Eng.*, 77, 211 (1981)
  13. "PWR Primary Water Chemistry Guidelines : Revision 1", EPRI NP-5960-SR, Palo Alto (1988)
  14. "PWR Primary Water Chemistry Guidelines : Revision 2", EPRI NP-7077, Palo Alto (1990)
  15. P.O. Aronsson et al., "High pH Operation at Swedish PWRs", EPRI Radiation Field Control Seminar, Palo Alto (1991)
  16. T.A. Beineke et al., "High pH Operation in ABB C-E Plants", EPRI Radiation Field Control Seminar, Palo Alto (1991)
  17. M.J.B. Hudson and T.F. Burns, "Radiation Field Reduction by Elevated pH Control at Millstone 3", EPRI Radiation Field Control Seminar, Palo Alto (1991)
  18. T.A. Beineke and P. Crinigan, "Evaluation of Elevated RCS Lithium Chemistry at Calvert Cliffs Unit 2", ASME/IEEE Power Generation Conference, Boston (1990)
  19. I. Mark, "Enriched Boric Acid Promises Greater Flexibility for PWR Operators", *Nuclear Eng. Int.*, 34, 47 (1989)
  20. E.C. Davey, "A Boron-10 Analyzer Engineered for CANDU Power Station Applications", Conference of the Can. Nuc. Soc., Toronto (1982)
  21. L.W. Green et al., *Can. J. Chem.*, 62, 1452 (1984)
  22. C.A. Jaeger, E.R. Ellis and T.F. Parkinson, "A Null-Type Instrument for On-Line Boron Analysis", *Trans. Amer. Nucl. Soc.*, 57, 78 (1988)
  23. T. Arita et al., *J. At. Energy Soc.*, 33, 152 (1991)
  24. C.A. Bergmann, "Evaluation of Selected Parameters on Exposure Rates in Westinghouse Designed Nuclear Plants", Proceedings of Int. Conference on Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems 5, BNES, p. 9 (1989)