

역삼투막의 선택적 제거특성을 이용한 원자력발전소 봉산수 중의 실리카 제거에 관한 연구

윤 석 원 · 박 광 규

전력연구원 재료부식연구소 수질부식그룹
(1997년 8월 20일 접수, 1997년 10월 8일 채택)

Study on Silica Removal from Borated Water Using Reverse Osmosis Membranes in Nuclear Power Plants

Seok-Won Yoon and Kwang-Kyu Park

Materials & Corrosion Research Laboratory, Korea Electric Power Research Institute,
103-16, Munji-dong, Yusung-ku, Taejeon 305-380, Korea
(Received August 20, 1997, Accepted October 8, 1997)

요 약 : 고온, 고압으로 운전되고 있는 원자력발전소의 1차 계통수측에서, 실리카는 양이온 불순물과 결합하여 핵연료 피복재에 규석(Zeolite)층을 형성하므로 계통구조물의 건전성에 영향을 미치게 된다. 따라서 핵연료와 접촉하는 1차 계통수측에서는 규제치 이하의 수준으로 실리카 농도가 유지되어야 한다. 본 논문에서는 실리카 제거 작업시 발생하는 방사성 폐기물의 양을 최소화 하고 봉산 소모량을 줄이기 위해, 상용화 되어 있는 5종류의 막을 이용하여 봉산 및 실리카가 함유된 수용액에 대한 조업온도, 공급유량 변화가 투과량, 붕소회수율, 실리카 배제율에 미치는 영향에 대하여 실험을 수행하였다. 이를 이용하여 계통수내에서 실리카 만을 효과적으로 제거할 수 있는 장치를 설계하였으며, 특성이 다른 2종류의 막을 3단으로 구성하여 상황변화에 따른 대응능력을 높였다. 실험 결과 기존 원자력발전소에서 사용하고 있는 Feed & Bleed 방법에 비해 폐기물 발생량은 7%에 불과했고, 농축 폐기물에 포함되어 소모된 봉산의 양은 15.7%에 불과하였다.

Abstract : The concentration of silica is required to meet a certain level because silica affects fuel and materials integrity by forming a zeolite layer on fuel cladding surfaces. When the established Feed and Bleed method is employed, nuclear waste increase and the corresponding amount of boric acid is constantly consumed. This study concentrates on minimizing the amount of nuclear waste and consumption of boric acid. Using five different membranes, operating conditions such as temperature, feed water flow rate, boric acid recovery and silica removal rate were examined. A silica-selective removal system was designed based on the above optimization procedures. Three-stage system was designed with two characteristically different membranes so that it could correspond with the different situation easily. Compared to the previous results of the Feed and Bleed method, the current method showed that the amount of nuclear waste was reduced to 7%, and the consumption of boric acid to 15.7%.

1. 서 론

가압경수로(Pressurized Water Reactor; PWR)에서 붕소는 원자로 제어봉과 함께 반응도 제어를 위해 사용되는데 붕산(Boric Acid)의 형태로 일차냉각계통에 공급된다. 핵연료 주기 초기에는 계통내의 붕소농도가 1500~1200ppm의 고농도에서, 핵연료의 연소에 따라 일일 약 3~5ppm씩 희석 운전하기 때문에 붕소농도가 점차 감소하게 되어 노심말기에는 붕소농도가 30~10ppm의 저농도로 된다.

반응도 변화에 따른 붕소농도를 조절하기 위해서는 Feed & Bleed 운전(붕산수와 보충수를 주입운전)을 하거나 붕소열재생계통(Boron Thermal Regeneration System; BTRS) 및 탈붕소이온교환기(Deborating Ion Exchanger)의 이온교환수지탑에 일차냉각재를 통과시킨다. Feed & Bleed 운전을 하게 되면 다량의 잉여 붕산수가 발생되는데 이들 붕산수는 붕소회수계통의 붕산증발기(Boric Acid Evaporator)를 사용하여 약 4%붕산(CB:7000ppm)으로 농축시켜 붕산저장탱크(Boric Acid Tank)로 회수한다. 회수되는 붕산수는 계통으로 재 사용되므로 원자로냉각재 계통내로의 불순물 유입을 막기 위하여 붕소회수계통에 설치된 이온교환수지탑을 거쳐 증발 농축되고 있다. 그러나, 붕산으로 포화운전되는 이온교환수지탑내에서는 붕산보다 이온선택도가 낮은 실리카는 이온교환수지에 흡착되지 않기 때문에 발전소의 가동년수의 증가에 따라 원자로 냉각재의 실리카 농도는 점차 증가하게 된다. 특히 핵연료 저장조에 bolaflex 재질의 조밀렉을 사용한 원전의 경우 5년정도 운영시 방사선에 의한 실리카 분해 용출현상이 나타나 실리카의 농도가 급증하게 된다.

한편, 실리카는 상온에서는 계통내에 장애 현상을 유발시키지 않으나 고온, 고압으로 운전되는 1차 계통수중에서 Ca, Mg, Al 등 양이온 불순물과 결합하여 핵연료피복재에 열전달을 방해하는 규석(Zeolite)층을 형성함으로써 국부가열(Hot Spot)에 의한 핵연료 손상을 일으킬 수 있으므로, 효율적인 실리카 제거기술이 요구된다[1,2].

그러나, 기존에 원전에서 사용하고 있는 Feed & Bleed에 의한 수질정화 방법은 다량의 폐수발생 및 붕산 추가보충이 필요하므로, 역삼투막(Reverse Osmosis; RO)을 이용한 붕산과 실리카의 최적 분리 및 회수조건에 대한 연구가 이루어지고 있다[1~8].

본 연구에서는 원전 1차 계통수중 붕산과 실리카에 대한 RO의 선택적 투과성에 대한 효율을 고찰하여 붕산수중의 실리카를 선택적으로 제거할 수 있는 장치를 개발하고자 하였다.

2. 실 험

2.1. Bench scale 실험

2.1.1. 막 소재 및 모듈 선정

RO막의 제조회사가 제시한 특성을 검토하여 RO막의 재질 및 형태에 따라 bench scale 시험용 막으로 다음과 같이 5종의 막을 선정하였다.

- Hydranautics사 SW CA 4040
 - Membrane type : Cellulose acetate spiral wound membrane
- Film Tech사 NF 40-4040
 - Membrane type : Nanofiltration SW thin film composite membrane
- Toyobo사 HR-5155
 - Membrane type : Cellulose acetate hollow fiber membrane
- Du Pont사의 B-9
 - Membrane type : Aramid hollow fiber membrane
- Red China사의 KH-8-ROS1
 - Membrane type : Cellulose acetate hollow fiber membrane

2.1.2. RO 실험장치

RO 실험장치는 10~50°C 운전범위에서 설정온도 ±0.5°C로 일정하게 유지할 수 있고, 사용압력은 1~50Kg/cm²이다. 사용유량은 0~28 L/min으로 설계하였고, 4인치 이하의 역삼투막 및 한외여과(Ultra-filtration; UF) 막의 2단계 처리 시험을 수행할 수 있도록 하였다.

장치연결 배관은 flexible tube를 사용하여 다양한 크기의 막연결, 보수 및 장치 개조가 용이하도록 하였으며, RO 실험장치의 flow diagram은 Fig. 1과 같다.

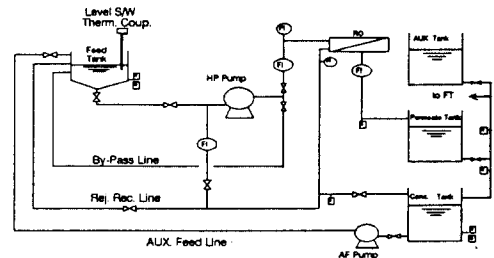


Fig. 1. Schematic diagram of RO test loop.

2.1.3. 실험방법

현장적용 RO장치를 개발하기 위한 RO막 성능실험

은 2단계로 진행되었다. 1단계에서는 처리수와 배제수를 공급탱크로 재순환시켜 봉산 및 실리카 농도가 일정한 조건에서 각종 운전압력, 온도, 유량조건에 따른 봉산회수율 및 실리카 제거율 변화거동을 평가하여 최적 운전조건을 도출하였다. 2단계 실험에서는 국내 원전 SFP의 봉산 및 실리카 농도와 같은 조건에서 30시간 동안 연속운전 실험을 실시하였다.

실험용 봉산수는 일본 Kanto Chemical사의 boric acid 및 Junsei Chemical사의 sodium silicate 특급 시약을 순수에 용해시켜 제조하였다.

RO막의 봉산회수율 및 실리카제거율 평가 1차 실험은 15℃, 25℃ 및 35℃에서 운전온도를 일정하게 유지하고, 운전압력을 변화시키면서 실시하였다. 2차 실험에서는 운전온도 및 운전압력을 일정하게 유지하고 원수회수율을 감소시키면서 실시하였다.

봉산농도는 0.1N NaOH 표준시약으로 적정하는 Titration-Mannitol 방법, 이온성 실리카는 UV spectrophotometer를 이용한 815nm에서 흡광법으로 분석하였으며, 이는 ASTM 표준분석법[9]을 인용정리하여 국내외 원자력발전소에서 사용하고 있는 Westinghouse Guidelines[10]에 따른 것이다.

봉산회수율 및 실리카 배제율은 다음과 같은 식으로 구하였다.

$$\text{봉산회수율} = \frac{C_{P,B}}{C_{F,B}} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{실리카배제율} = \frac{C_{F,S} - C_{P,S}}{C_{F,S}} \times 100 \quad (2)$$

하첨자의 F는 공급수(Feed), P는 투과수(Permeate)를 의미하며, B는 봉산, S는 실리카를 나타낸다.

2.2. Pilot plant 제작 및 시험

2.2.1. 장치 제작

울진 원자력발전소에 적용하기 위한 RO 장치는 bench scale 실험결과를 근거로 제작되었다. 자체 실험에서 봉산수 정화처리에 가장 적합한 것으로 평가된 중국전력사의 KH-8-ROS1 RO막 15개를 1단에 설치하였으며, 2단 역시 중국전력사의 KH-8-ROS1 RO막 4개를 설치하였다. 3단에는 방사성 폐기물의 양을 최대 줄이기 위한 농축운전용으로 Film Tec사의 BW30-8040막 4개를 설치하였다. 따라서 운전은 1단 단독, 1단+2단, 1단+3단, 3단 단독의 4가지 모드가 가능해지며, 처리하고자 하는 feed

의 상황에 따라 간단히 변환이 가능하다. 중국전력사의 막은 각각 1 m³/hr의 생산량을 가지고 있고, Film Tec사의 막은 각각 1.25 m³/hr의 생산량을 가지고 있으며, 장치의 정상 작동 유량은 15 m³/hr이고, 최고 운전압력은 20 kg/cm²이다. 장치의 사용자재는 원전 품질등급(R-Class)을 사용하였고, 상세부품을 선정 한 후에 골조(Frame) 구조와 부품설치 위치의 적정성을 평가하기 위하여 원자력발전소의 중요설비에 준하는 내진평가(Seismic Category II)를 유한요소해석법(Finite Element Method: FEM) program ANSYS를 이용하여 modal analysis하고, 골조 일부를 보강하였다. 장치의 크기는 발전소 내에서 이동과 설치에 지장이 없는 3.5 m×1.8 m×1.9 m(W×D×H)의 규모로 제작되었으며, 작업중 운전원의 방사선 피폭을 고려하여 운전 압력, 유량, 전도도 등 주요 운전상태를 실시간(Real Time) 원격감시가 가능하게 하였다.

2.2.2. 운전방법

RO장치의 성능시험 결과, 1단 RO막의 단독운전은 봉산수중의 실리카 농도가 1 ppm 미만이고, 봉산회수율을 높일때(90~95%) 효과적이었으며, 1단+2단 RO막의 운전은 실리카 농도가 1 ppm 이상이고 봉산회수율을 95% 이상으로 높일 때 효과적이었다. 또한 1단+3단의 운전은 봉산수중의 실리카농도가 1 ppm 이상으로 높은 상태에서 실리카 회수율을 높일 경우 효과적이며, 3단 단독 운전은 최종폐액 처리시 실리카 제거율을 98% 이상으로 높일 때 효과적이었다. 따라서 본 연구에서는 실리카 농도 제한치인 0.2 ppm을 훨씬 상회하고 있는 울진원전의 사용후 핵연료저장조수를 대상으로 폐기물 발생량을 최소화시키면서 처리할 수 있는 운전 모드를 택하였다. 가장 효과적인 운전모드로, SFP의 정화운전에는 1단+2단 운전을, 폐기물 처리 농축운전에는 3단 단독운전 모드를 적용하였다.

첫 번째 공정으로 1단과 2단의 KH-8-ROS1막을 사용한 SFP의 실리카 제거 운전시 운전온도는 20~25℃, 운전압력 16~17 kg/cm², 공급유량 16~18 m³/hr였으며, 이때 feed로 사용된 SFP의 봉산수 용량은 1350 톤이었다. SFP의 봉산수는 1단의 KH-8-ROS1막을 거쳐 투과수는 SFP로 다시 보내고, 농축수는 2단의 KH-8-ROS1막을 거쳐지며, 2단의 투과수는 역시 SFP로 보내고 농축수는 별도의 탱크에 보관하여 다음 공정에 사용하게 된다.

두번째 공정으로, 운전중 발생되는 농축수를 3단의 BW30-8040 막으로 재 농축하여 발생되는 폐기물의

양을 최소화하였으며, 운전온도 26~30℃, 운전압력 19~20kg/cm², 공급유량 5~6m³/hr에서 실시하였다. 여기서 운전온도가 SFP에 비해 상승한 것은 배제수 측을 계속 순환시키며 운전시, 장치 자체의 열(펌프 등)에 의한 것이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. Bench scale RO장치의 성능시험 결과

3.1.1. 양이온 및 음이온 불순물의 제거율

실험에 사용한 5개 RO막에 대해 원수(Raw Water) 중의 Na와 8개 원소에 대한 적정 운전압력에서의 불순물 제거율과 처리수 생산능력을 평가하였으며, 주요내용은 Table 1과 같다. Hydranautic사 SW CA 4040 막은 양이온 및 음이온의 제거율이 매우 높으며, 운전압력이 감소되어도 제거율이 크게 떨어지지 않았다. Film Tec사 NF 40-4040 막은 1가이온과 2가이온의 배제율 차이가 현저하였고, SO₄의 제거율은 99% 수준이지만 실리카를 포함한 음이온 제거율이 매우 낮았으며, 운전압력 20 Kg/cm² 부근에서 불순물제거율이 가장 좋은 것으로 나타났다. Toyobo사 HR-5155는 운전압력 20 Kg/cm² 부근에서의 제거율이 가장 좋았으며, 불순물 배제율은 매우 높았지만 Hydranautic사 SW CA 4040 막보다는 약간 낮았고, 실리카(SiO₂)의 제거율은 98% 수준으로 가장 높았다. Du Pont사 B-9막의 불순물 제거율은 90% 이상이며 실리카 배제율도 높았지만, 운전압력이

낮으면 다른 제품에 비하여 Cl 및 SiO₂의 배제율이 현저히 감소하는 경향이였다. Red China KH-8-ROS1막의 운전압력별 Na, K, Ca 및 Mg의 제거율은 Fig. 2에 나타내었다. Ca, Mg은 96~97%의 제거율을 보였으며, 10kg/cm² 이하에서 Na 및 K의 제거율은 현저히 감소되었다. 음이온 불순물의 제거율은 SO₄ > SiO₂ > Cl > NO₃의 순서이며(Fig. 3 참조), SO₄는 운전압력

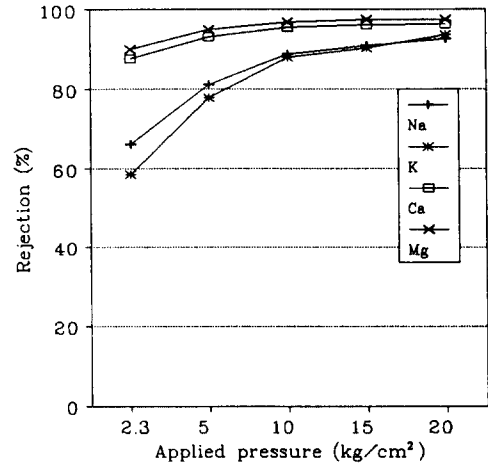


Fig. 2. Effect of the applied pressure on cation rejection at 25°C.

Table 1. Specification and Test Results of Membranes

	Hydranautic SW CA 4040	Film Tec NF-4040	Toyobo HR-5155	Du Pont B-9	Red China KH-8-ROS1
Membrane material	Cellulose Acetate	Thin-Film Composite	Cellulose Acetate	Aramid	Cellulose Acetate
Type	Spiral wound	Spiral Wound	Hollow Fiber	Hollow Fiber	Hollow Fiber
Element dimension (Diameter×Length)	4" × 40"	4" × 40"	6" × 17.5"	12cm × 40cm	4" × 24"
Oper. temperature	< 40℃	< 45℃	5~40℃	-	5~35℃
Oper. pressure(kg/cm ²) (Max. Oper. Pressure)	15 ~ 40 (40)	10 ~ 30 (41)	20 ~ 30 (40)	10 ~ 25 (27)	10 ~ 19 (20)
Permeate flow (ℓ/min)	2.4 ~ 8.6	3.0 ~ 8.2	1.0 ~1.8	1.3 ~ 3.2	2.1 ~4.2
Cation rejection (%)	94 ~ 99.9	57 ~ 86	98 ~ 99.5	90 ~ 99.8	90 ~ 97
Anion rejection (%)	97 ~ 99.9	10 ~ 99	88 ~ 99.9	96 ~ 99.6	83 ~ 96
Silica rejection(%)	~ 96	26 ~ 34	~ 98	93 ~ 96	85 ~ 91

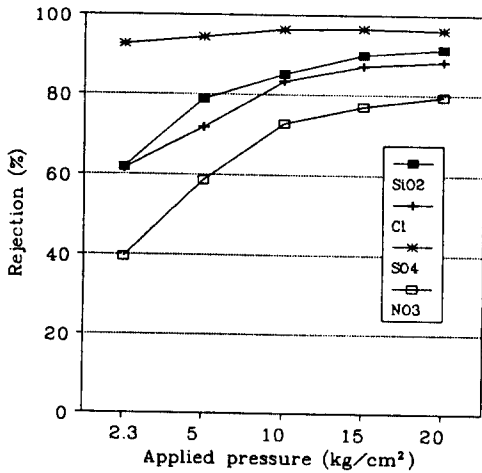


Fig. 3. Effect of the applied pressure on anion rejection at 35°C.

변화에 큰 영향없이 93%이상 제거되었으나, SiO₂, Cl 및 NO₃의 제거율은 운전압력이 저하될 경우 감소현상이 양이온보다 뚜렷하였으며, 10 Kg/cm² 이상에서 실리카(SiO₂)의 제거율은 85%~91%였다. KH-8-ROS1막은 중국전력사에서 생수 생산을 목적으로 개발되어 RO 막과 Nano 막의 중간특성을 갖고 있으며, 봉산의 투과율은 높고 실리카 투과율은 비교적 낮아 봉산수 정화처리에 아주 적합한 것으로 평가되었다.

3.1.2. 붕소회수율 및 실리카제거율

운전압력, 온도, 배제유량 등의 각종 운전조건 변화에 따른 5개 RO막의 붕소회수율 및 실리카제거율 실

Table 2. Performance Data of Membranes

	Boron recovery(%)	Silica rejection(%)	Recovery difference(%) (Boron-Silica)
Hydranautic (SW CA 4040)	23 ~ 68	> 95	20 ~ 64
Film Tec (NF 40-4040)	94 ~ 99.9	3 ~ 31	2 ~ 30
Toyobo (HR-5155)	30 ~ 55	> 97	30 ~ 53
Du Pont (B-9)	41 ~ 81	75 ~ 90	35 ~ 60
Red China (KH-8-ROS1)	83 ~ 99	72 ~ 90	65 ~ 80

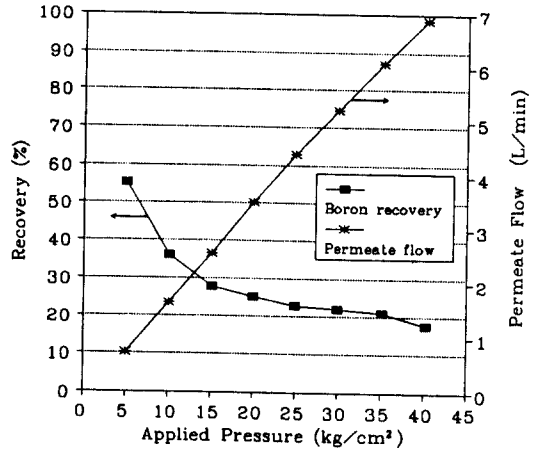


Fig. 4. Effect of the applied pressure on the boric acid and the silica recovery at 25°C.

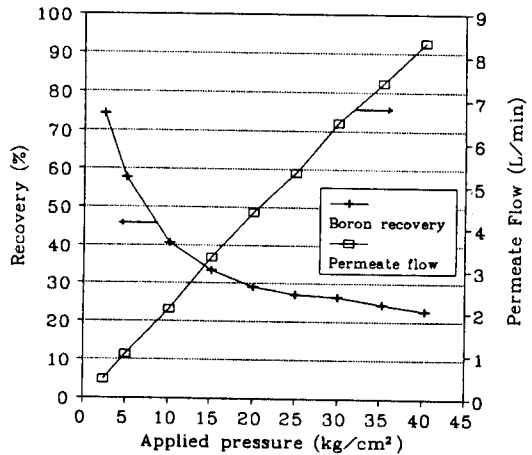


Fig. 5. Effect of the applied pressure on the boric acid and the silica recovery at 35°C.

험결과를 비교하면 Table 2와 같다.

Hydranautic사 SW CA 4040 막은 실리카제거율이 높고 운전온도가 상승되면 붕소회수율이 0.5~0.6%/°C 증가하였다. 붕소회수율은 운전압력 증가시 현저하게 감소하였고(Fig. 4 및 5 참조), 배제유량을 감소시켜 원수 회수율을 높이면 붕소회수율이 1.6~2.1배 증가하였다. 운전압력이 낮으면 생산수량이 저하되므로 10Kg/cm² 이상의 운전압력에서 운전온도를 25~35°C를 유지하면서 배제유량을 감소시켜 운전하면 50~65%의 붕소회수가 가능할 것으로 판단되었다.

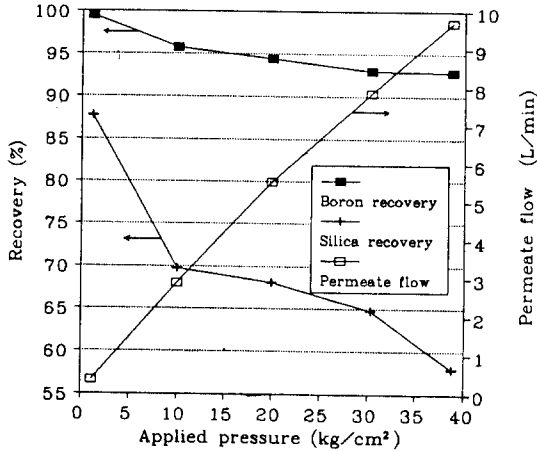


Fig. 6. Effect of the applied pressure on the boric acid and the silica recovery at 25°C.

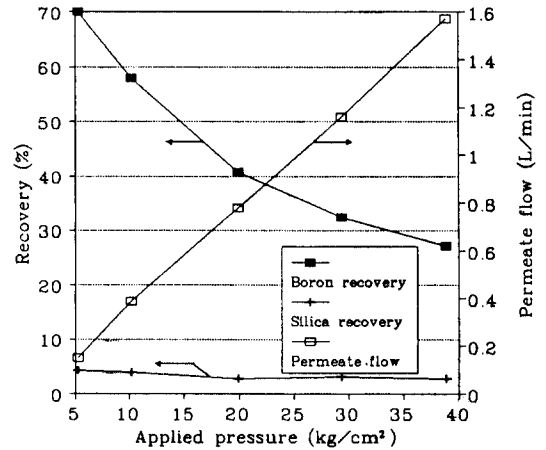


Fig. 8. Effect of the applied pressure on the boric acid and the silica recovery at 25°C.

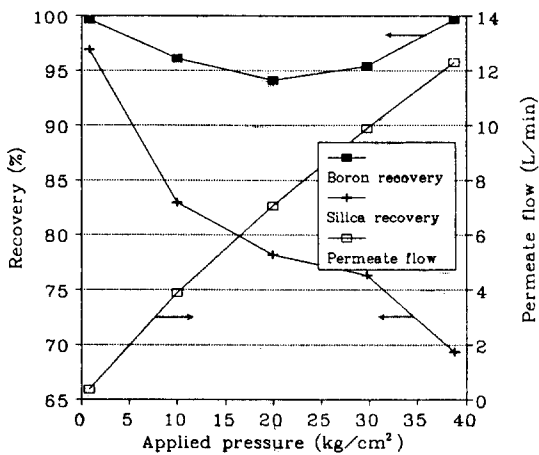


Fig. 7. Effect of the applied pressure on the boric acid and the silica recovery at 35°C.

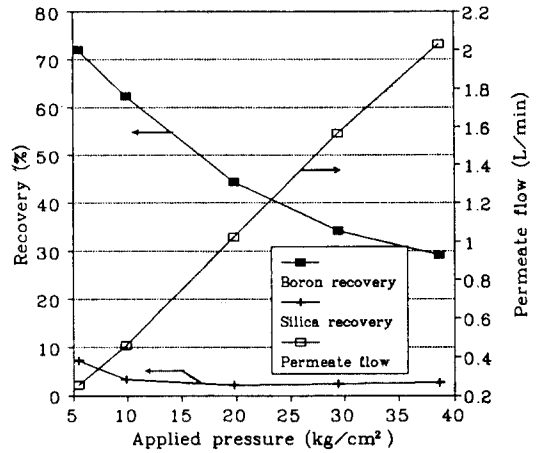


Fig. 9. Effect of the applied pressure on the boric acid and the silica recovery at 35°C.

Film Tec사 NF 40-4040 막은 붕소투과율이 매우 높고 운전온도 상승시 붕소보다는 실리카투과율이 증가하며 운전압력이 올라가면 실리카제거율이 약간 상승하였다(Fig. 6, 7 참조). 또한, 원수회수율(투과수/공급수)을 증가시키면 실리카투과율이 현저히 증가하므로 원수회수율을 50~60%로 운전하여도 붕소와 실리카의 투과율 차이가 15~30% 수준으로 낮게 유지될 것으로 평가되었다.

Toyobo사 HR-5155막은 실리카제거율이 97% 수준으로 매우 높지만, 운전압력이 증가하면 붕소투과율

이 현저히 감소하여 20 Kg/cm²이상시 붕소투과율이 30~40%이고(Fig. 8, 9 참조), 원수회수율을 증가시키도 ~50% 수준이므로, 붕산수 정화처리용으로 적합하지 않은 것으로 판단되었다.

Du Pont사 B-9막은 운전압력 증가시 실리카보다는 붕소투과율 감소가 뚜렷하였고(Fig. 10, 11 참조), 원수회수율을 증가시켜 운전하면 50~60%의 붕소와 실리카 투과율 차이를 유지할 수 있는 것으로 나타났다.

Red China KH-8-ROSI막은 운전온도 상승시 붕소와 실리카 투과율에 큰 영향을 미치지 않으나, 운전

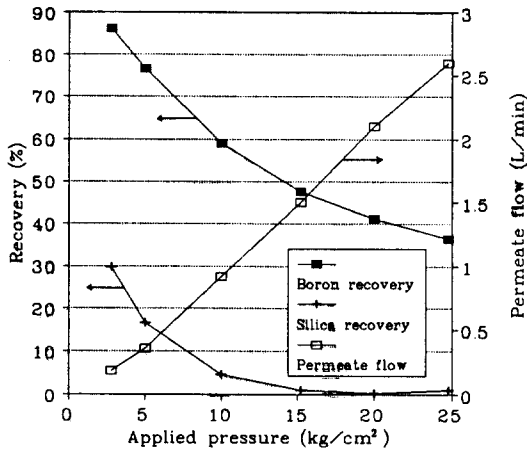


Fig. 10. Effect of the applied pressure on the boric acid and the silica recovery at 25°C.

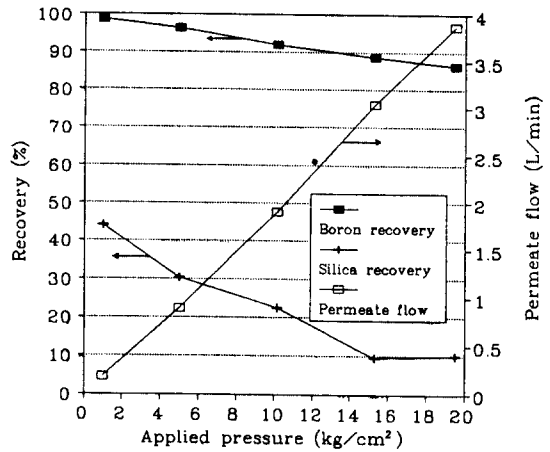


Fig. 12. Effect of the applied pressure on the boric acid and the silica recovery at 25°C.

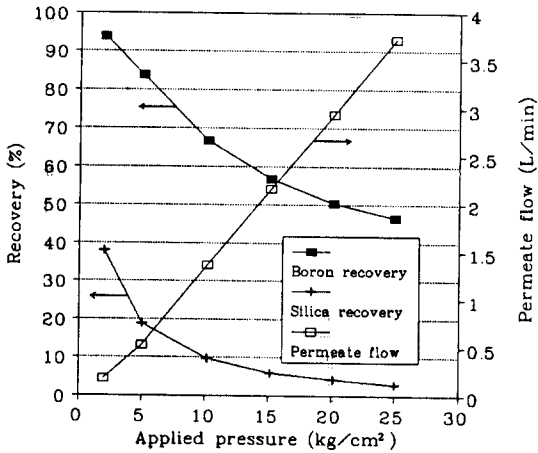


Fig. 11. Effect of the applied pressure on the boric acid and the silica recovery at 35°C.

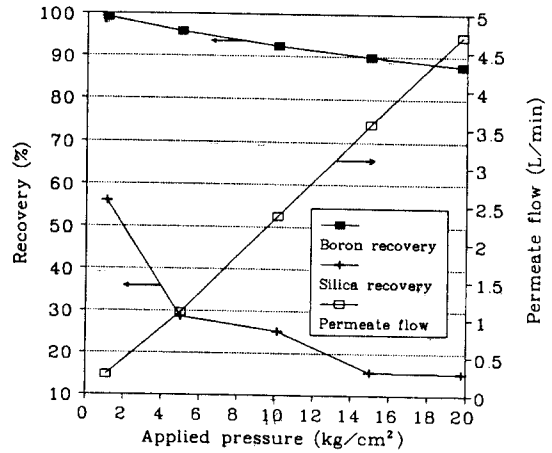


Fig. 13. Effect of the applied pressure on the boric acid and the silica recovery at 35°C.

압력 상승시는 실리카 투과율이 현저히 감소되었다 (Fig. 12 및 13 참조). 운전온도 25~35°C, 운전압력 10~20 Kg/cm²에서 붕소회수율은 90%대로 높게 유지할 수 있으며, 붕소와 실리카의 투과율 차이도 70~80% 수준이 가능하였다. 따라서, bench scale 실험 결과로는 봉산수중의 실리카 제거에 Red China KH-8-ROS1막이 가장 적합한 것으로 평가되었다.

3.2. Pilot plant의 운전 결과

장치는 울진 원자력발전소의 사용후핵연료저장조수

를 정화시키기 위해 '96. 12. 14~'97. 4. 18일까지 SFP 정화운전에 393.3시간, 폐기물 재처리운전에 550시간 가동시켰으며, 신 핵연료의 반입작업등으로 인해 장치는 제한적으로 운전하였다. 개발 제작된 장치로 봉산수중의 실리카를 효과적으로 제거할 수 있었으며, 폐기물 농축 공정중에도 봉산폐액의 농축운전으로 인한 fouling 및 재질열화 등에 대한 막의 성능은 매우 양호한 상태를 유지하고 있었다.

운전 결과 기존 원전에서 사용할 수 있는 Feed & Bleed 방법과 비교[5]하여 RO장치를 이용한 경우 방사

선 폐액량 14배, 붕산 사용량 6배 절감할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 RO막의 선택적 투과특성을 이용하여 원전 1차 계통수로 사용되고 있는 붕산수중 실리카의 제거특성에 대하여 고찰하였다.

선정된 5종류의 막에 대한 붕산 및 실리카의 투과 특성 실험을 실시한 결과 중국전력사의 KH-8-ROS1 막의 투과도 차이가 70~80% 수준으로 원전의 붕산수중 실리카 제거에 가장 효과적인 것으로 나타났다.

원전에 적용한 RO장치는 붕산수 회수용으로 KH-8-ROS1막과, 붕산폐액의 농축용으로 FilmTec의 BW30-8040막으로 구성하였으며, 처리용량 15m³/hr의 설비로 제작하였다. 본 장치는 처리시간의 단축과 방사선 폐액 발생을 최소화 하기 위하여 3단으로 구성하였고, 처리 대상 수질의 실리카 농도에 따라 운전모드(Mode)의 변경이 용이하게 제작 하였다. 운전결과 기존의 Feed & Bleed 방법에 비하여 폐기물량을 14배 감소시키고, 붕산의 소모량을 6배 절감할 수 있음을 입증하였다.

급전에 개발한 RO막을 이용한 붕산수중의 실리카 제거기술은 선택적으로 대상 이온 및 핵종들의 분리 제거가 가능한 기술로, 원전에서 다양한 종류의 폐액처리 시에도 유용하게 사용할 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

1. D. B. Malkmus, International Water Conference '91, 85-87(1991).
2. J. Glenn, "Removing Silica by Reverse Osmosis", Nuclear Engineering, **36**, 43, 1991.
3. S. D. Strauss, "Membrane Treatment Removes Silica from Borated Water, Reduces Radwaste", Power, **131**, 74-76(1987).
4. 이근우, "Treatment of Radioactive Borated Liquid Wastes by Reverse Osmosis", Waste Management Conference, 265 - 269(1991).
5. D. B. Malkmus, "Operating Experience of a Full Size Reverse Osmosis Plant for Removal from the Borated Water Systems in a Nuclear Power Generating Station", IWC-91-11, 85-91(1991).
6. T. P. Hillmer and D. P. Swindlehurst, "Use of Reverse Osmosis for Treating Radwaste at PALO VERDE", Waste Management Conference, 323 - 325(1986).
7. B. G. Kniazewycz, and J. Markind, "Boric Acid Reclamation Systems (BARS)", Waste Management Conference, 291 - 294(1986).
8. B. G. Kniazewycz, et al., "KLM's Boric Acid Reclamation Systems (BARS)", Waste Management Conference, 123 - 126(1987).
9. Annual Book of ASTM Standards, **11.01**, 365, 654(1986)
10. Westinghouse Guidelines for Secondary Water Chemistry(SGTD-S.1.1-4468)