

하나로에서 PTS 사용에 따른
기체 방사성 폐기물 발생량 저감에 대한 연구

A study on decreasing the gaseous radioactive waste production
due to the PTS usage in HANARO

강태진, 황승렬, 임인철, 전병진, 김선하, 이형섭
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

하나로에서 환경으로 방출되는 공기 중의 방사성 가스 농도가 매우 높게 상승하는 일이 2001년 1월 약 수초 동안 발생하였다. 배출 공기 속의 방사성 가스 농도 변화 원인을 확인하기 위하여 가스 농도가 급히 상승하기 전후의 각종 실험시설 사용여부를 조사하였고, 원자로실의 각 위치별로 공기를 포집하여 공기 중 핵종과 방사능을 측정하였다. 그 결과, 방사성 가스의 대부분을 차지하는 Ar-41 농도의 증가는 PTS(Pneumatic Transfer System: 공압이송장치)를 사용하는 NAA(Neutron Activation Analysis: 방사화분석) 조사 시험과 관련이 있음을 확인하였다. 또한, PTS 계통에서 방사화된 공기가 원자로실로 누설되고 있음을 발견하였다. NAA 조사관의 누설 부위를 봉합하고, 조사시험이 끝나면 조사관으로 소량의 질소가스를 연속적으로 공급하여 공기의 방사화를 줄이는 실험을 하였다. 실험 결과 방출 공기중 Ar-41의 농도가 평균 $2.37 \times 10^{-5} \mu\text{Ci/cc}$ 에서 $8.87 \times 10^{-7} \mu\text{Ci/cc}$ 로 감소하였음을 확인하였다.

Abstract

In Jan. 2001, it occurred that the radioactive gas concentration included in the air exhausted through a duct from the HANARO reactor hall to the atmosphere, sharply increased and it lasted about few seconds. Through the investigation on the operating history of utilization facilities and sampling of reactor hall air, it was revealed that the major isotope was Ar-41 and the sharp increase was related to the usage of PTS for NAA. In addition, several leak spots were found at the PTS pipe joints. The leak spots were sealed and, an experiment to supply nitrogen into the PTS was performed to see the effect of this on the decrease of activation. As result, the average concentration of Ar-41 in the exhausted air decreased from $2.37 \times 10^{-5} \mu\text{Ci/cc}$ to $8.87 \times 10^{-7} \mu\text{Ci/cc}$.

1. 서론

하나로 원자로 건물은 준 격납용기(Confinement)로서 평상시에 외부 공기의 유입과 유출이 있다. 원자로실 내의 공기 중에 있는 방사성 가스의 농도를 감시하는 장치로는 원자로실 공기오염감시기(RE19G)가 있으며, 환경으로 방출되는 공기 중의 방사성 가스 농도를 감시하는 장치로는 원자로건물 굴뚝에 설치되어 있는 기체 방사성 폐기물 감시기(RE22G)가 있다. 원자로 운전 중에 생성될 수 있는 방사성 가스는 N-16, N-17, O-19 등 단반감기 핵종과 Ar-41과 같이 상대적으로 긴 반감기를 갖는 핵종이 있지만 Ar-41이 환경으로 방출되는 방사성 가스의 대부분을 차지하며 주 감시 대상이다. 이들 감시기의 지시값 중 RE22G의 지시값이 매우 높게 상승하는 일이 2001년 1월 12일 오후 약 수초 동안 발생하였으며, 이러한 이상 상승 현상은 그 이후 빈번하게 발생하였다. 원인 파악을 위해 RE22G 지시값의 peak가 발생한 시간을 전후하여 HTS(Hydraulic Transfer System: 수력이송장치)와 PTS 등의 실험시설 사용 여부, 동위원소 인출 여부, beam 실험 현황, 그리고 원자로실 출입자 등의 사항을 다각도로 조사하였다. 그 결과, RE22G 지시값 상승은 PTS를 이용한 NAA 조사 시험과 관련이 있음을 발견하였다.

이후 원인의 상세한 분석과 방사성 가스의 농도를 저감시키기 위한 여러 가지 일들이 수행되었다. 본 논문에서는 이와 관련되어 수행한 일들과 그 결과를 기술하였다.

2. 본 론

2.1 하나로 PTS 장치 개요

NAA는 시료를 적절한 시간 동안 원자로의 중성자로 방사화시켜 생성된 방사성 핵종이 방출하는 특정 감마선을 HP-Ge 반도체 검출기를 이용하여 분석함으로써 시료 속에 포함된 원소의 종류 및 양을 측정하는 분석법이다 [1].

NAA를 위해 사용하는 PTS는 중성자를 조사시키는 조사공과 시료를 준비실(PTS Room)에서 충전하여 조사공까지 이송시키고 다시 회수하는 공압 이송 장치, 그리고 조사된 시료를 분석하는 측정장치로 구성되어 있다. 하나로에 있는 PTS 계통의 구성은 그림 1 같다. 조사공은 원자로에 설치되어 있으며, 공압 이송 장치는 일정한 압력의 기체(질소)를 이용하여 27 cc 용량의 rabbit을 방사화분석실에서 원자로에 설치된 방사화분석 조사공으로 보내어 단시간(1~20분) 조사시킨 후, 다시 방사화분석실의 분석기로 rabbit을 이송하는 일련의 시스템이다. 시료를 분석하는 측정장치는 MCA(Multichannel Analyzer), Ge-Si 반도체 검출기, NAA 용 PC 및 S/W 등으로 구성되어 있다 [2].

2.2 하나로 기체 방사성 폐기물 감시 계통

하나로 기체 방사성 폐기물 감시 계통으로는 원자로건물 굴뚝 감시기(RE22), RCI 굴뚝 감시기(RE23) 및 RIFP 건물 굴뚝 감시기(RE24)가 있으며, 각각 입자, 옥소, 불활성 기체를 측정한다. 굴뚝에서 측정된 기체 방사능 값은 제어실과 방사선안전관리실의 RMS(Radiation Monitoring System) 모니터에 표시된다. 또한, 원자로실에는 공기오염감시기(RE19)가 설치되어 있다. 원자로를 순환한 뒤 환경으로 배출되는 공기, 즉 기체 방사성 폐기물 중에 포함된 방사성 가스의 농도는 원자로 굴뚝(Stack)에 설치된 검출기(RE22G)로 공기를 측정함으로써 감시된다. 이 감시설비는 크게 검출기 및 현장 지시기, 검출기 신호를 전송하는 통신 하이웨이 및 방사능 정보를 처리, 저장 및 표시하는 컴퓨터와 정보 전송 네트워크로 구성된다. 현장의 검출기는 주로 검출기, 검출기 신호처리부, 제어 및 지시기 패널로 구성되며, 기체 입자 검출기에는 공기 유로를 제어하는 샘플링 모듈(Sampling assembly)이 추가되어 있다. 통신 하이웨이는 송신부의 RS-232C 통신포트와 장거리 전송을 위한 RS-232C/RS-485 변환 모듈 및 수신부의 RS-485/RS-232C 변환 모듈과 RS-232C 통신포트로 구성되어 있다. 방사능 정보처리 및 표시 전산설비와 네트워크는 현장 신호를 중계하는 I/O module, 굴뚝으로 배출된 방사능 준위를 표시하는 3개의 디지털 표시기, 자료 처리 및 저장용 주컴퓨터(IOCA : Input/Output Computer A), IOCA에서 방사능 준위 정보를 받아 표시하는 여러 개의 RMT(Radiation Monitoring Terminal) 및 IOCA와 RMT사이에서 정보를 교환하는 네트워크로 구성되어 있다. 현장에서 측정된 방사능 준위는 현장 지시계에 표시되고, 지시된 정보는 RS-232C/RS-485 통신 라인을 통해 RMS I/O module로 들어와 경보 처리 및 이력이 관리되고 지시계 및 RMS의 CRT에 표시된다 [3].

2.3 기체 폐기물의 방사능 증가 원인 분석

High peak 발생 원인을 확인하기 위하여 peak 발생 전후의 기체 폐기물 방사능 농도 변화 추이를 확인하였다. 그림 2는 2001년 2월 중 RE19G와 RE22G 감시기에서 측정된 값의 변화를 보여준다. 이를 통해 PTS 조사 시험 중에 high peak가 발생함을 알 수 있었으며, peak의 원인을 찾기 위한 조사를 시작하였다. 원자로실의 각 위치 별로 공기를 포집하여 공기 중에 포함된 방사성 가스의 핵종과 방사능을 알아보았다. 방사선안전관리실 요원과 함께 수조 옆 PTS 디버터(Diverter) 상부와 주변, 원자로 홀 공기 감시기 앞, 원자로 수조 상부 등 PTS에서 누설된 기체의 밀도가 높을 것이라 생각되는 위치에서 공기를 포집하여 MCA로 분석하였다. 분석 결과는 표 1과 같으며, PTS 디버터 주변에서 포집한 공기에서 방사성 물질 농도가

6.4E-7 $\mu\text{Ci}/\text{cc}$ 로 가장 높았다. 원자로 운전 중에 생성될 수 있는 방사성 가스는 N-16, N-17, Ar-41, O-19 등이다. 주 검출 핵종은 반감기가 1.827시간인 Ar-41이었으며 포집부터 MCA 분석까지 10분 이상이 걸리기 때문에 단반감기 핵종은 검출되지 않았다. 처음에는 RE22에서 발생하는 high peak가 3~4초 정도 유지되는 것으로 보아 peak의 주원인을 O-19와 같은 단반감기 핵종인 것으로 잘못 판단하고 이의 해소를 위한 실험을 하기도 하였다.

Ar-41은 공기의 약 1%를 차지하는 Ar-40이 방사화되어 생긴다. 하나로에서 Ar-41이 생성되는 경로를 보면, 첫째로는 NAA 조사공에서의 공기 방사화, 둘째로는 중성자 빔포트 조사공에서의 공기 방사화, 셋째로는 원자로 수조 냉각수에 녹아 들어간 Ar이 노심을 지날 때 방사화된 뒤 수조 표면으로 올라와 다시 공기 중으로 방출되는 3가지 경우로 나눌 수 있다. 각각의 경우에 대해 Ar-41 생성량을 추정해 보면, 수조 표면에서 방출되는 양은 수조 고온층을 설치한 이후 크게 낮아졌음이 주기적으로 측정하는 수조 냉각수의 방사능 분석으로 확인되었다. 그럼에도 불구하고 굴뚝으로 방출되는 기체 방사성 폐기물의 양은 거의 변화가 없었으므로, 대기로 방출되는 전체 Ar-41의 양 가운데 수조에서 나가는 비율은 매우 작은 것으로 판단되었다.

PTS에서 공기를 사용하며, 생성된 기체는 바로 배출된다고 가정하고 계산하였을 때 PTS에서 생기는 Ar-41은 빔 포트 조사공의 약 300배였다. PTS는 좁고 긴 관이므로 사용하지 않을 때는 공기 배출 속도가 매우 느려서 방출되기 전에 붕괴되는 몫이 클 것이며, 실제 방출되는 양은 PTS 사용 빈도와 관련이 있다. Ar-41이 2000년에는 반년에 약 100 Ci가 방출되었고 2001년에는 약 180 Ci가 방출되었으므로 이만한 양을 보낼 수 있는 곳은 PTS 밖에 없다고 판단되었다.

2.4 PTS 계통 누설 방지 및 plugging 작업

누설 검사액(Snappy)을 원자로 홀 내의 PTS-1의 파이프 연결 부위 및 vent line의 연결 부위에 뿌리고 빈 시료통을 1 bar의 질소 가스로 삽입 및 인출하면서 누설 시험을 2~3차례 실시하였다. 확인된 누설 부위는 그림 3과 같다. 누설부위를 아세톤으로 깨끗이 닦고 에폭시를 바른 후 고무 테이프로 감아 누설을 방지하였다. 그러나, 이와 같은 작업에도 불구하고 굴뚝에서의 Ar-41 방출량은 별로 줄어들지 않았다.

환경으로 방출되는 Ar-41의 양을 원천적으로 줄이기 위한 대책중의 하나로 방사화 분석 조사관으로써 기능을 상실한 NAA-2/3 조사관의 원자로 수조 유입 배관을 격리하였다. 조사관의 격리는 수조밖으로 빠져 나와 있는 입, 출구 배관의 연결

부를 분리하여 판형 테프론 가스켓으로 plugging 하고 다시 연결하였다. plugging 후 3일 동안 원자로를 운전하면서 굴뚝 모니터 RE22G의 측정 자료를 검토한 결과 환경으로 방출되는 Ar-41의 농도가 평균 $2.37 \times 10^{-5} \mu\text{Ci/cc}$ 에서 $5.03 \times 10^{-6} \mu\text{Ci/cc}$ 로 감소한 것으로 확인되었다. 그림 4는 NAA-2/3 조사관의 plugging 전, 후의 RE22G 측정치 변화를 보여 주고 있다.

2.5 질소 공급 효과

하나로 방사화 분석 조사공으로써 기능을 상실한 NAA-2/3 조사관의 원자로 수조 유출입 배관을 격리하여, 환경으로 방출되는 Ar-41의 양을 약 75% 정도 감소시켰다. 그 외 현재 사용하고 있는 NAA-1 조사관의 누설부도 다수 확인하여 조사공으로의 공기 유입을 차단하였다. 그러나 이와 같은 추가 작업에도 불구하고 굴뚝에서의 Ar-41 방출량은 기대만큼 줄어들지 않았다. 누설 방지 및 plugging 작업 이후 다시 RE22G 감시기의 측정값 변화 경향을 정밀 분석하여, Ar-41을 줄이기 위한 추가적인 방안으로 조사시험이 끝나면 NAA-1 조사관에 소량의 질소가스를 연속적으로 공급하는 실험을 하였다.

그림 5는 NAA-1 조사공에 질소 가스를 공급하는 계통도이다. 실험을 위한 임시 질소 가스 공급 계통은 방사화분석 조사공에서의 시료 인출 시에 질소 가스를 공급하는 라인에 T자 배관과 밸브를 설치하고 약 3m 길이의 호스로 액체 질소통과 밸브사이를 연결하여 구성하였다. NAA 조사 시험 중에 임시 실험 배관을 통해 질소 가스를 연속적으로 공급하면 rabbit 인출 시에 문제가 발생할 소지가 있으므로 조사 시험 전에 밸브를 정렬하여 질소 가스 공급을 차단하고, 조사시험이 끝나면 밸브를 다시 정렬하여 질소 가스를 공급하였다.

방사화분석 조사공에 질소를 공급하는 시험은 14-2-1 주기와 14-2-2 주기 운전 동안에 NAA 조사시험을 하지 않는 시간에만 실시하였다. 그림 6에는 14-2-1 주기 운전 중의 공기오염감시기 지시치의 변화를 나타내었다. 표 2에는 실험기간 동안의 RE22G 감시기의 지시치 변화를 각 운전 형태별로 나타내었다. 이 그림과 표에서 알 수 있듯이 질소 공급시의 RE22G의 평균치는 $8.87 \times 10^{-7} \mu\text{Ci/cc}$ 로 운전 중에 질소를 공급하지 않으면서 측정한 평균값 $8.92 \times 10^{-6} \mu\text{Ci/cc}$ 에 비해 1/10 수준으로 감소하였다.

3. 결 론

하나로 운전 중에 생성될 수 있는 방사성 가스는 N-16, N-17, O-19 등 단반감기 핵종과 Ar-41과 같이 상대적으로 긴 반감기를 갖는 핵종이 있지만 Ar-41이 환

경으로 방출되는 방사성 가스의 대부분이며 주 감시 대상이다.

이들 감시기 중 원자로실에서 환경으로 방출되는 방사성 가스를 감시하는 원자로 건물의 굴뚝 감시기 RE22G의 방사성 가스 농도가 상승하는 일이 발생되어 다각도로 검토한 결과 NAA를 위한 PTS의 사용과 관련성이 있음을 발견하였다. 이에 따라 PTS 이용과 RMS 경보 발생과의 상관 관계를 규명하기 위한 검토를 수행하였고 PTS 이용시 Ar-41 배출이 RMS 경보의 원인임을 확인하였다.

NAA 조사관의 누설부를 막고, 조사시험이 끝나면 방사화분석 조사관으로 소량의 질소가스를 연속적으로 공급하는 실험을 실시한 결과 원자로실 굴뚝을 통한 배출 공기 중 Ar-41의 농도가 평균 $2.37 \times 10^{-7} \mu\text{Ci/cc}$ 에서 $8.87 \times 10^{-7} \mu\text{Ci/cc}$ 로 감소하였음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 정부의 출연금에 의한 기관고유사업으로 수행되었기에 감사의 뜻을 표한다.

참 고 문 헌

- [1] 정용삼 외, 방사화분석 이용연구, 한국원자력연구소, KAERI/RR-1505/94, 1994.
- [2] 정환성 외, 중성자 방사화분석용 공압 이송시스템 제어, 한국원자력연구소, KAERI/TR-1576/2000, 2000.
- [3] 김정택 외, Y2K 문제 해결을 위한 하나로 및 부속설비의 방사선감시계통 전산설비 개선, 한국원자력연구소, KAERI/RR-2059/99, 1999.

표 1. 원자로실 공기 포집 일시 및 분석 결과

포집 일시	포집 위치	원자로 출력	분석 결과	
			검출 핵종	방사능($\mu\text{Ci}/\text{cc}$)
2.14(수) 14:00	수조열 PTS Diverter 상부	정지	N.D	-
2.15(목) 10:00	수조열 PTS Diverter 상부	24 MW	N.D	-
2.15(목) 14:00	RE19 모니터 앞	24 MW	Ar-41	6.26E-8
2.16(금) 10:30	Diverter 주변 (단기 조사시)	24 MW	Ar-41	6.4E-7
2.16(금) 14:00	Diverter 주변 (장기 조사시)	24 MW	Ar-41	1.74E-7
2.16(금) 16:30	원자로 수조 상부	24 MW	Ar-41외 3종 (Nb-95, Xe-133, Xe-135)	8.68E-8

표 2. 14-2-1 주기('01. 12) 운전중의 RE22G 변화량

단위: $\mu\text{Ci}/\text{cc}$

구분	RE22G 측정값		평균값	측정기간 (hr)	비고	
	최소	최대				
출력 상승 전	1.0×10^{-7}	2.678×10^{-6}	1.181×10^{-6}	20	B.G	
조사 시험 미실시	질소 미공급	8.5×10^{-6}	1.10×10^{-5}	8.92×10^{-6}	4	24MW 출력 운전
	질소 공급	1.05×10^{-7}	2.38×10^{-6}	8.87×10^{-7}	46	24MW 출력 운전
조사 시험 중	1.023×10^{-7}	4.728×10^{-6}	1.28×10^{-6}	18	질소공급 중단	

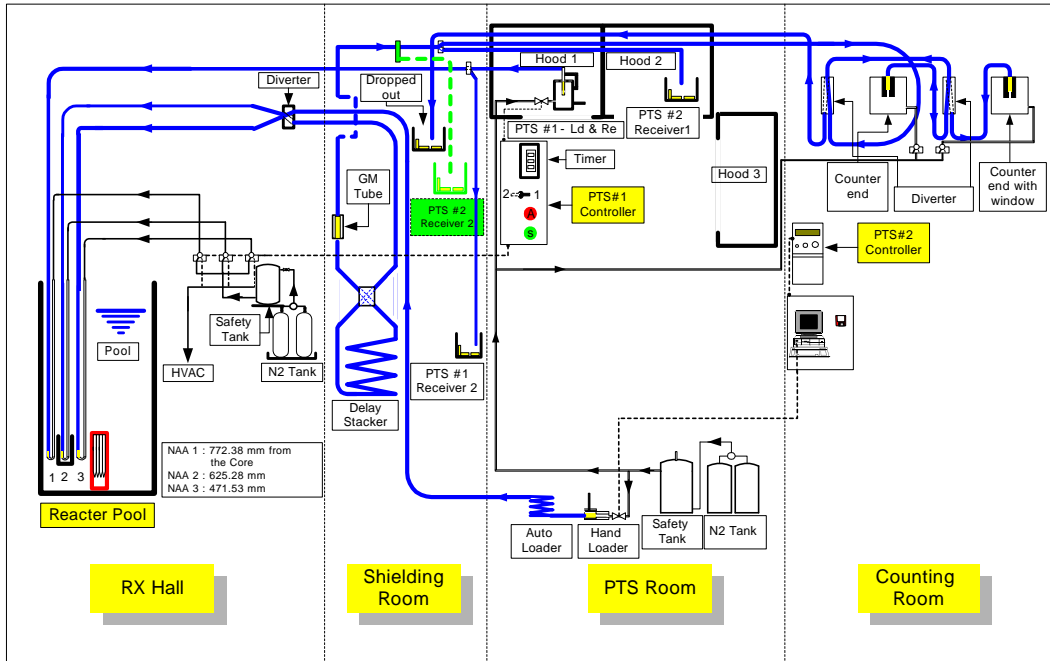


그림 1. 방사화 분석을 위한 하나로의 공압 이송장치 구성도

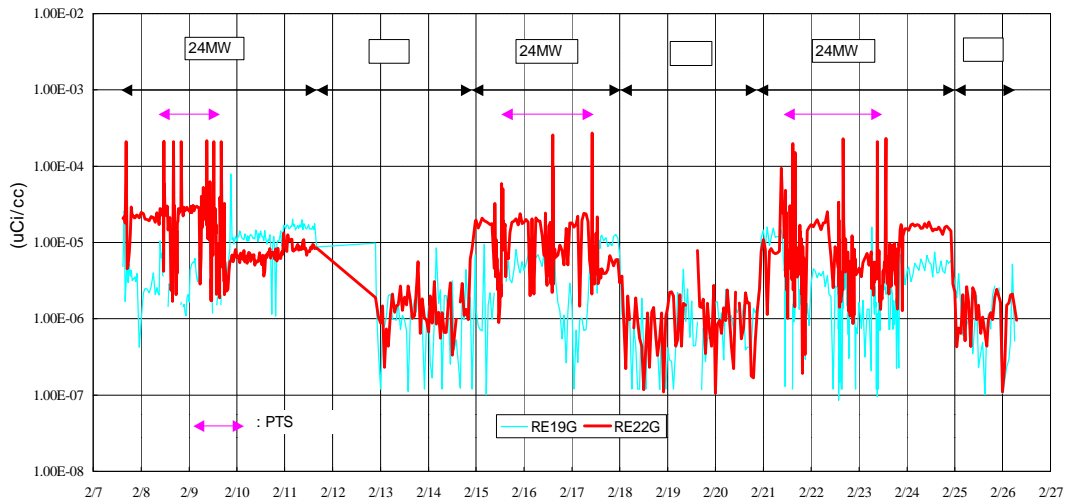


그림 2. 하나로 원자로실에서의 방출 기체의 방사능 농도('01.2)

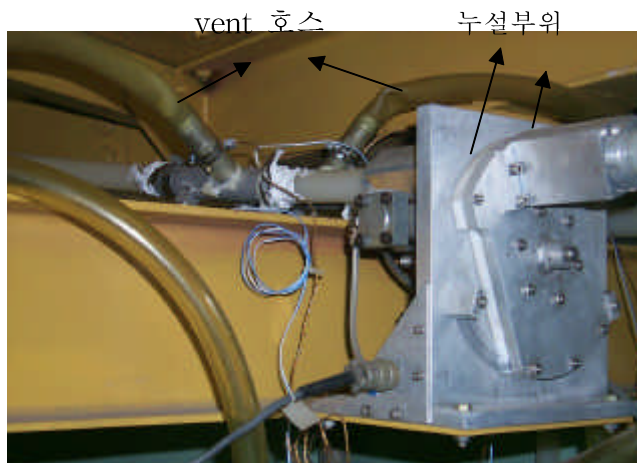
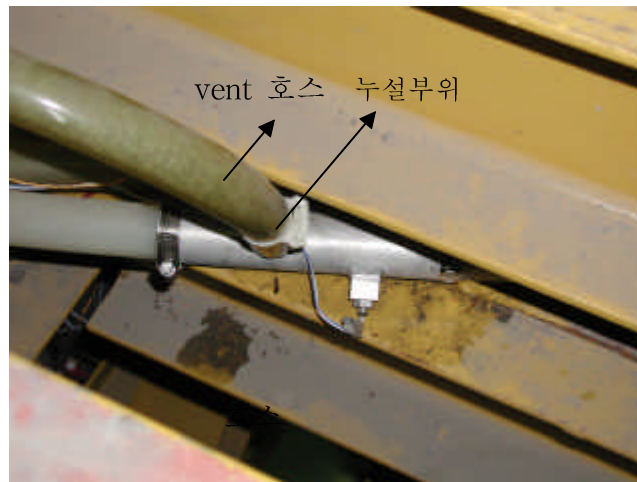
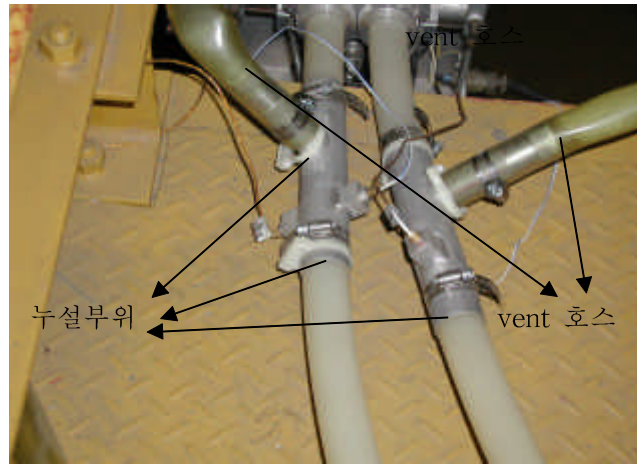


그림 3. PTS 라인 누설 부위

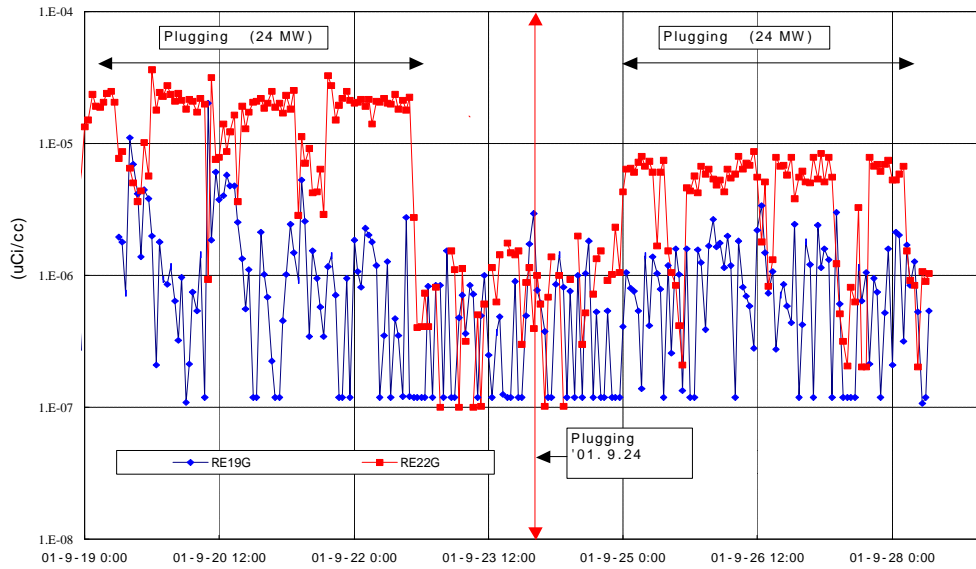


그림 4. NAA-2/3의 plugging 전, 후 공기오염 감시기의 지시치 변화

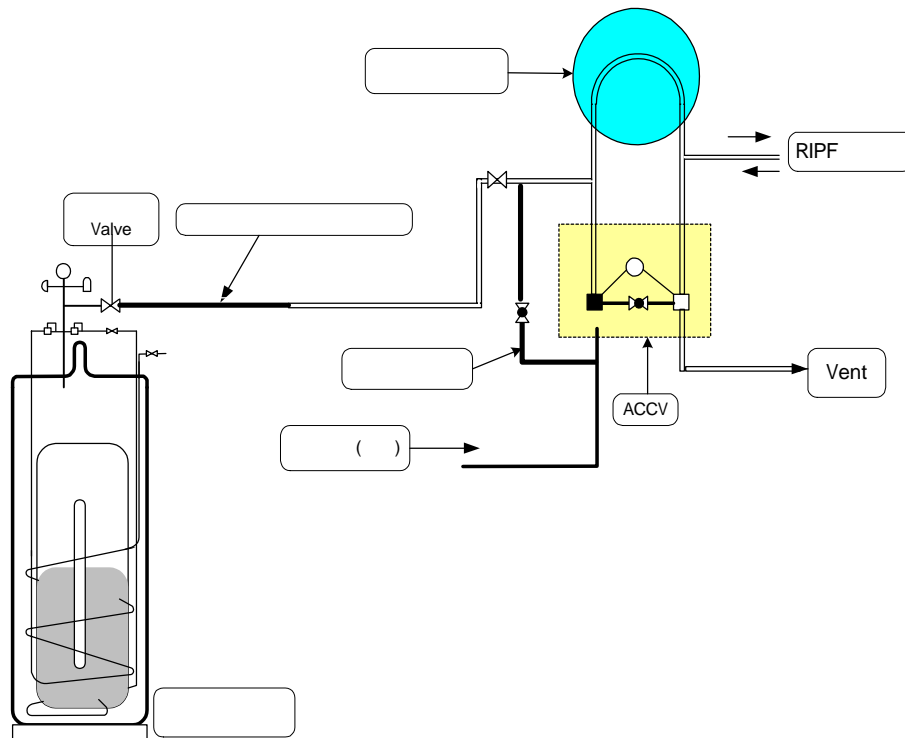


그림 5. NAA-1 조사공의 질소 가스 공급 계통도

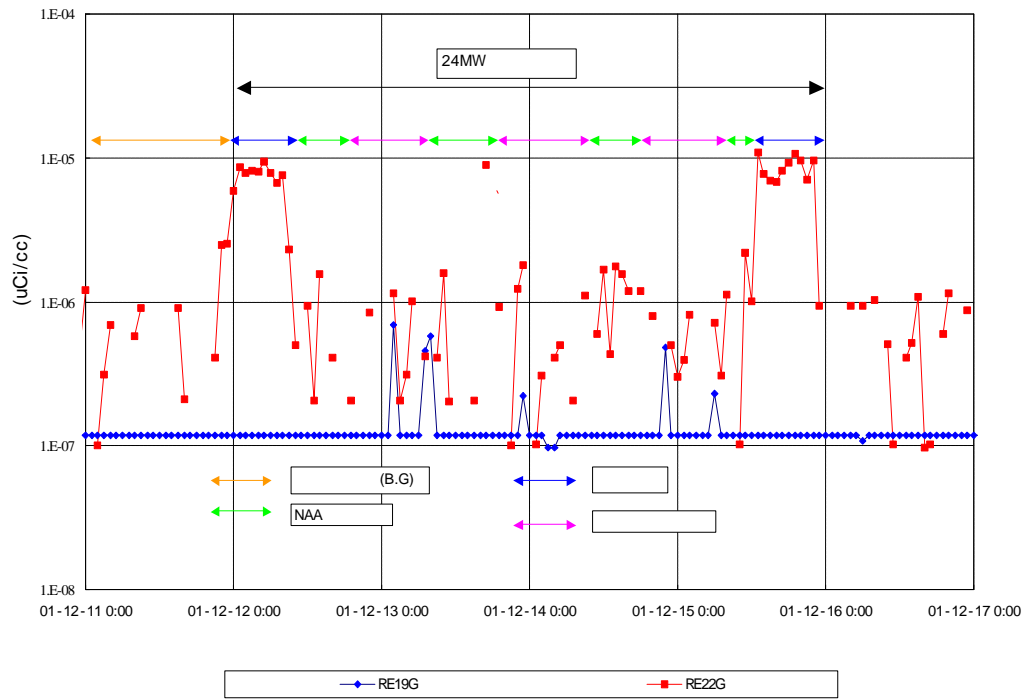


그림 6. NAA 계통에 소량의 질소를 연속 공급하는 효과 비교