

# 원전의 격납건물배기계통 도입현황

2018. 08. 30

김민진

# 목 차

**I** 격납건물여과배기계통(CFVS)

**II** OECD 국가의 CFVS 도입현황

**III** 각국의 CFVS 설계 및 기술적 특징

**IV** CFVS 국내 진행현황

**V** 결론



## I 격납건물여과배기계통(CFVS)

- 원전 중대사고(SA)시 격납건물보호
  - 여과계통을 통한 배기로 격납건물 압력상승에 의한 손상방지
- 방사능물질 누출 감소를 통한 환경오염 감소
- 체르노빌 사고 이후 유럽의 원전에 많이 설치됨
- 후쿠시마 사고 이후 좀 더 광범위하게 설치되고 있음



## II OECD국가의 CFVS 도입현황

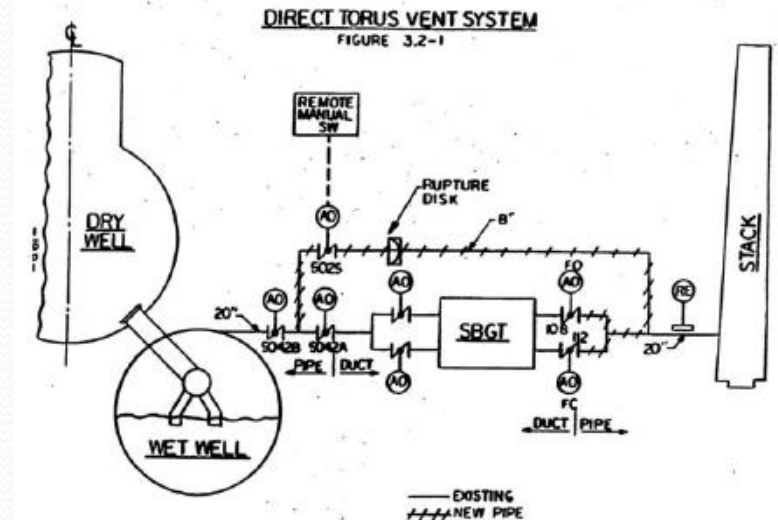
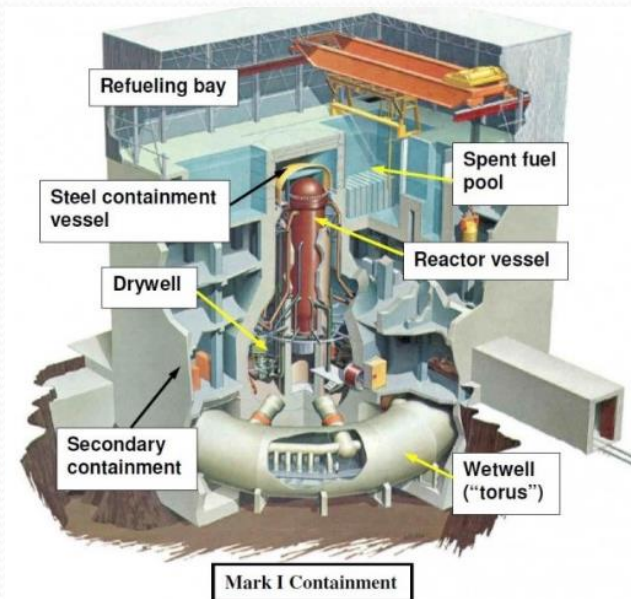
국가	원전수	CFVS	HSSPV	Metal+ sand-bed	DFM	FITRA-MVSS	SULZER CCI	EFADS	Comments
벨기에	7 PWR		○						2016년에서 2018년까지 5 unit의 HSSPV+ 계획중, 2 unit는 평가중
브라질	3 PWR		○		○				
불가리아	2 VVER 1000		●						
캐나다	19 PHWR Single unit(1) Multi units(18)		●		○			●	Point Lepreau 1 unit(HSSPV), Darlington 4 units(DFM), 18 units가 4 EFAD를 공유, EFAD는 내진설계
체코	4 VVER-440	■							CFVS 계획없음
	2 VVER-1000	■							중대사고관리지침과 연관하여 평가중
핀란드	2 VVER 440	■							FCV는 대기압보다 낮은 압력에서도 취약한 금속 shell 격납건물을 가진 VVER-440에서는 타당성이 없음, 건설중인 EPR시설에 설치예정
	2 BWR		●						
프랑스	58 PWR			●					격납건물 내부에 금속 프리필터, sand 필터는 격납건물 외부
독일	7 PWR		●		●				2 unit에 DFM
	2 BWR		●						
일본	24 PWR		○		○				PWR : 특수안전시설에 FCV를 계획중(설계 미확정), BWR을 위해 HSSPV 및 scrubber 계통 계획중, 추가 CFVS는 특수안전시설로 계획
	26 BWR		○						
멕시코	2 BWR	■							MARK II형 건습식 Hardened CVS 적용중
네델란드	1 PWR		●						
루마니아	2 PHWR		○						HSSPV 계획중
슬로바키아	4 VVER-400	■							다른 중대사고관리지침과 함께 평가중
러시아	6 VVER-440	■							후쿠시마 사고 이후 몇 VVER에 대해 평가중, 다른 형식에는 고려않음
	11 VVER-1000								
슬로베니아	1 PWR				●				2013년 DFM을 Krsko NPP에 rupture disk 식 피동형으로 설치
한국	19 PWR	□							월성1호기에 HSSPV 설치, 다른 호기에 FCV 설치 계획중, 한국형을 개발중
	4 PHWR	●	●						
스페인	6 PWR		○						PWR: CFVS 적용을 계획 BWR: Hardened venting이 설치되어 있음, 필터 적용을 2017년 계획
	1 BWR	□							
스웨덴	3 PWR					●			
	7 BWR					●			
스위스	3 PWR		●				●		Gosgen: HSSPV형 Muhleberg: F-MVSS형
	2 BWR					●	●		
타이완	2 PWR	□							
	4 BWR								
우크라이나	2 VVER-440	□							
	13 VVER-1000								
미국	69 PWR	■							BWR Mark I&II에 Hardened CVS 지침문서 준비중, 2018년초 적용
	35 BWR	■							



### Ⅲ 각국의 CFVS 설계 및 기술적 특징

#### ● 미국

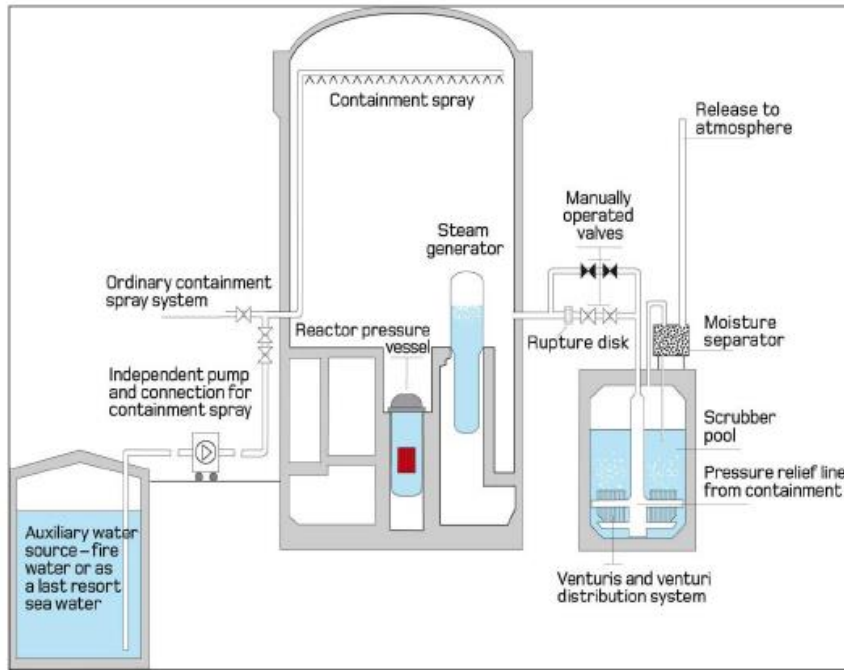
- TMI 사고후 MARK I/II BWR에 강화된 배기설비(Hardened Venting System) 설치
- 24기에 대하여 자발적설치/반영 권고
- 방사선펙종을 제거하는 별도의 필터는 없음
- 후쿠시마 사고후 강화된 배기계통 요건화 준비중
- 경수로형 원전에 설치필요성은 현재까지 보류



## ● 스웨덴

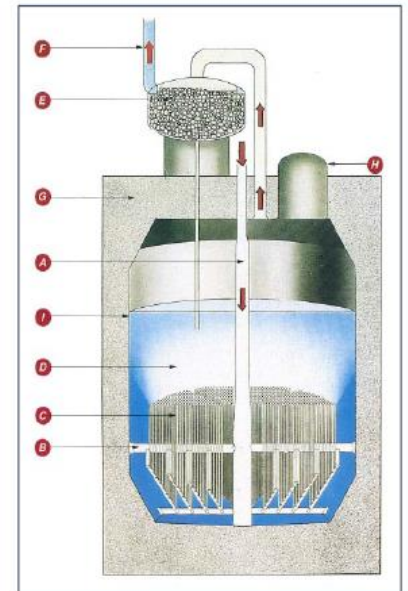
- TMI2 사고후 CFVS의 필요를 최초로 인식, 1981년 규제요건화, 1988년 모든 원전에 설치하도록 요구
- 최초는 gravel-bed 타입으로 1985년 설치
- 나머지는 1988년 FILTRA-MVSS 타입을 개발 설치

### 스웨덴 PWR의 CFVS



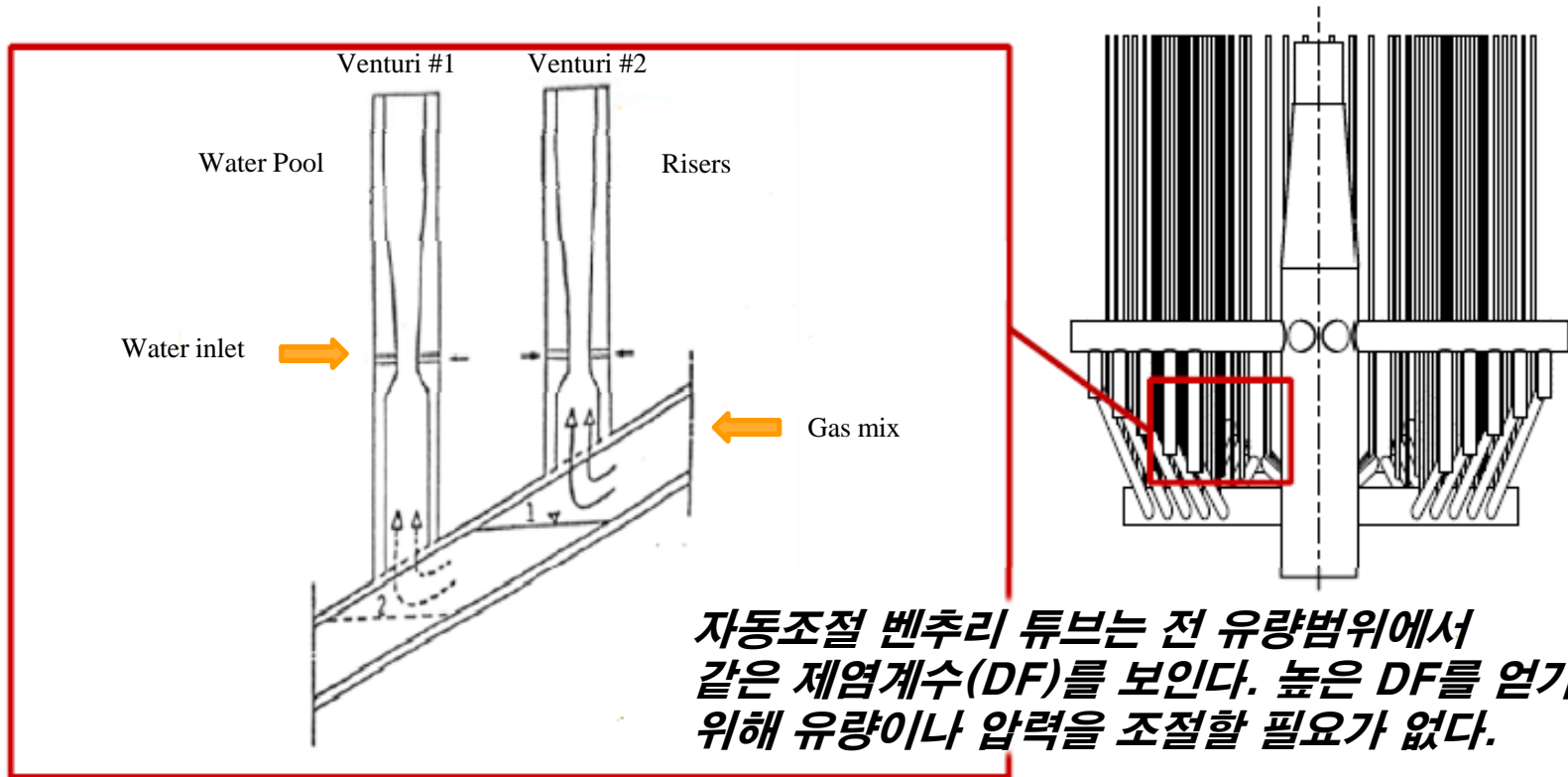
### Multi-venturi scrubber system (FILTRA-MVSS)

- A: Pressure relief line from reactor containment
- B: Venturi distribution system
- C: Venturis including riser pipe
- D: Water Pool
- E: Moisture separator
- F: Vent to atmosphere
- G: Concrete pressure vessel
- H: Manhole
- I: Steel liner





# FILTRA-MVSS System design Venturi pipes Westinghouse 형(ABB 개발)



## • 기본설계 요건 및 특징

- 에어로졸 및 입자요오드의 최소 제염계수: BWR(100), PWR(500)
- 입자요오드와 유기요오드 일부 제거에 차아황산나트륨( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ ), pH 조절에 탄산나트륨( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )
- 파열판에 의한 피동작동, 조기 venting은 능동작동
- 24시간 피동운전(운전원의 간섭없이) 가능
- 선원항 평가에서 최적의 제염계수(DF)는 BWR(500), PWR(1500)
- 비활성기체 및 유기요오드는 제거하지 못함
- 수소연소를 방지하기 위한 질소 주입(격납건물과 벤추리세정기 사이)
- PWR 정상운전시 세정기@ 90°C 유지
- Venting 시작때 수소 연소를 방지하기 위한 설계



## ● 프랑스

- 금속필터 + Sand bed filter
- PWR에 체르노빌 사고후 '86년 CFVS 설치 결정
  - 1995년까지 모든 NPP에 CFVS 설치 완료
  - 2011년 3월 후쿠시마 사고후 CFVS의 적절성과 설계 재검토
- Sand bed filter 검증시험
  - PITEAS 프로그램: 1982~1986년 sand bed filter의 각 파라미터 결정
  - FUCHICA 프로그램: 1990년 CFVS를 Full scale로 시험
- 금속 프리필터의 검증시험
  - 여과기 매체의 설계 및 결정(1990-1993)

- **기본설계 요건**

- DF 10 이상(by PITEAS program)
- 정상운전시 여과기 응축이나 막힘을 방지
- 전원사용의 최소화
- 방사능 누출 모니터링
- 정상운전시 부식방지

- **추가요건(설치결정 후)**

- CFVS 입구의 수소연소 리스크 고려 전기식 프리히터 설치
- 옥상의 sand bed에 의한 방사선 피폭 고려
- Sand bed filter 여과 핵분열생성물 감소
  - RB내에 금속 프리필터 설치(에어로졸 DF>10)
  - 2가지 대표적 SA(중대사고) 고려
    - 노심용융없는 SA: 주로 CsOH(FP)여과, 필터 막힘 없게
    - 노심용융있는 SA: 에어로졸(노심용융+핵분열생성물)여과



- 후쿠시마사고 이후 추가요건
  - 스트레스 테스트 후 추가
    - 노심용융을 포함한 중대사고에도 격납건물을 가능한 한 개방하지 않고 전용 heat sink에 의한 냉각계통을 붕괴열을 제거하는 방법 적용(방사능누출을 막기 위해)
    - 심층방어 측면에서 격납건물 보호 및 CFVS의 내진성능 강화
- 필터 효율
  - 에어로졸 DF>1000(sand bed filter DF>100, 금속 프리필터 DF>10)
  - 입자요오드 DF > 10 (I<sub>2</sub>가 주로 여과됨)

## ● 관련 운전절차 (U5)

### ● 일반개념

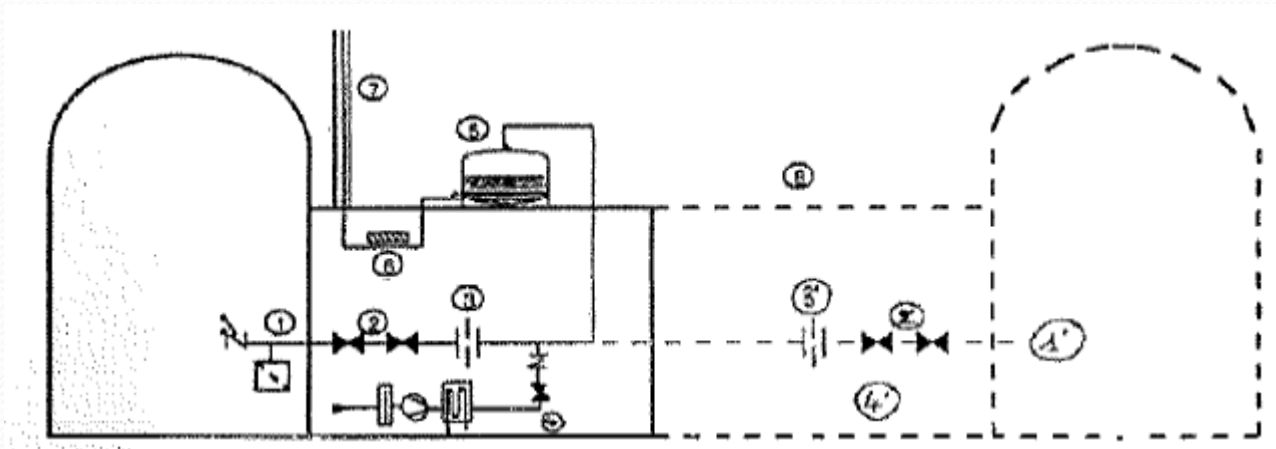
- 격납건물 손상 및 장기적 환경오염 위해의 실질적 제거
  - CFVS는 격납건물 내부압력이 설계치(~0.5 Mpa)에서 모든 margin을 포함한 저항값(0.6~0.7 Mpa) 사이 도달시 개방
    - 격납건물에 FP를 가두는 것이 안전목표(CFVS 설치에도 안전목표에 근본적 변화는 없음)
    - CFVS의 개방은 격납건물 건전성을 보호하기 위한 최후수단이므로 가능한 한 지연시키고 회피되어야 함

### ● 주개념

- CFVS 개방은 위의 안전개념에 따라 여러 의견 조율 후 수행
  - 부적절한 조기개방 방지(rupture disk 같은 자동동작 없음)
    - 격납건물에 공간이 있어 사고 발생 후 24시간 동안 개방불필요(주민보호, 소개, 옥소제 복용 등)



# • CFVS 구조



## LEGEND

1. Pre-filter

Existing penetration, 300 mm diameter for 1300 MWe plants, 250 mm diameter for 900 MWe plants

2. Manual valves, operated by reach rods from behind shielding

3. Pressure letdown orifice

4. Filtered dry air supply during normal operation / Preheating for "H2 risk" in case of SA

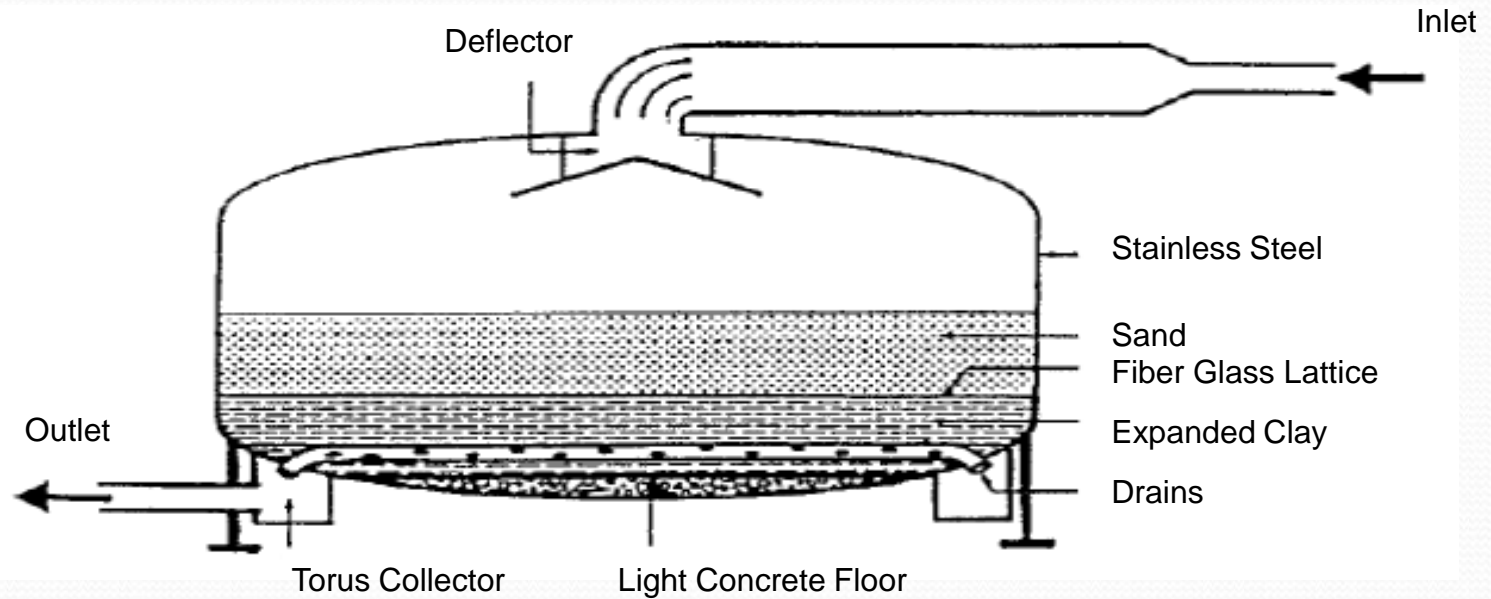
5. Sand filter

6. Radiation monitor

7. Pant stack, with small vent stack

8. Arrangement for twin units

## • Sand bed filter



**EDF 특허, 직경: 7.32m, 높이: 4 m**  
**중량: 12 톤(빈통), 92톤(운전중)**



## ● 일본

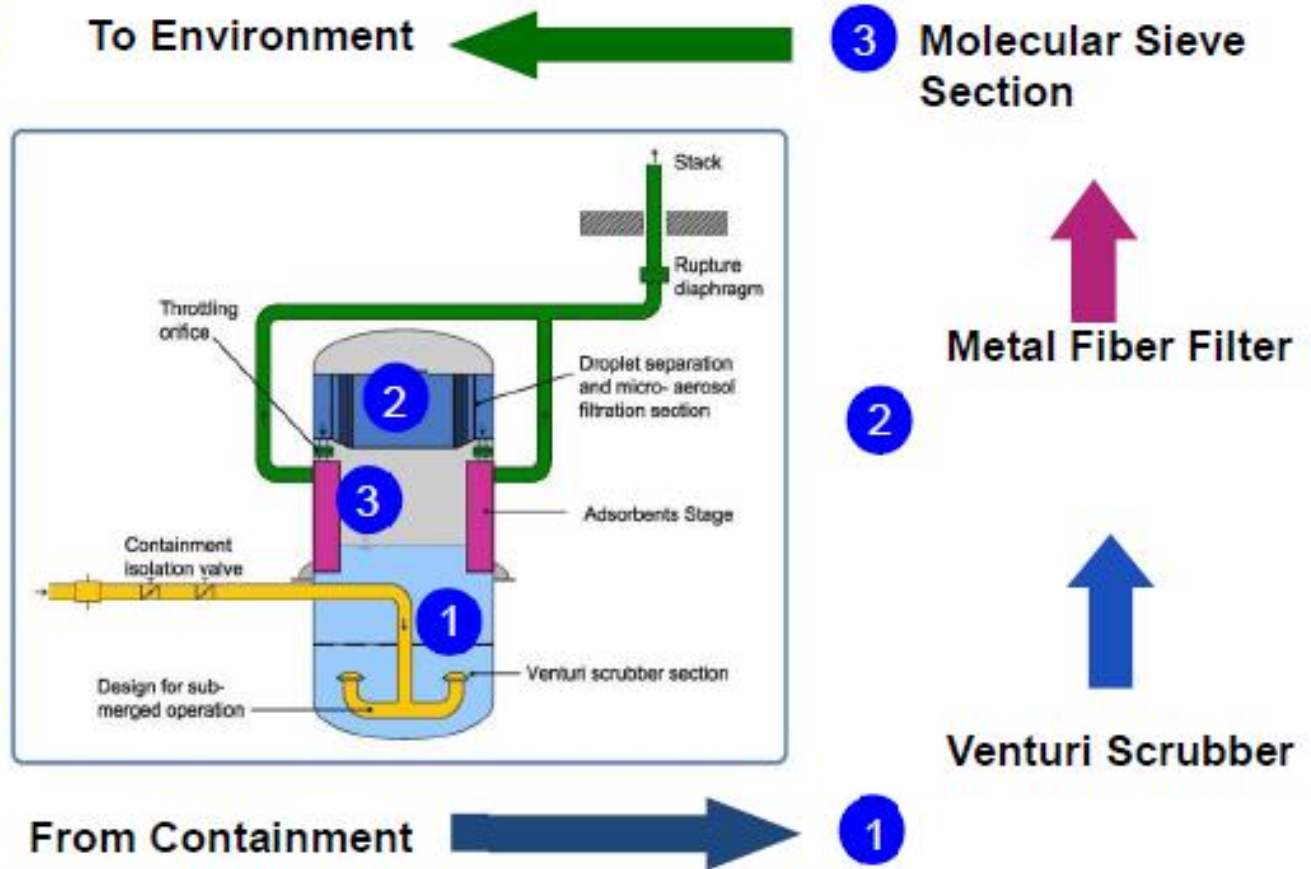
- 격납건물 내의 압력과 온도를 감소시키기 위한 기기와 절차(CFVS)를 노심용융사고를 대비하여 구비하라는 규제요건수립(2013년)
  - CFVS는 배기가스에서 방사능물질의 양을 감소시킬것
  - 가연성 가스의 폭발을 방지하기 위한 기기 구비
  - 가동시 음압에 의한 격납건물 손상 방지
  - 격리밸브를 수동으로 쉽게 개폐
  - CFVS의 수동작동을 위해 차폐와 격리설비 등 구비
  - 격리밸브 구동력 상실시 보조 구동기구 구비
  - 파열판(rupture disk)이 우회밸브와 같이 설치됨(예외: 설정압력이 낮거나 수동 파열기구가 설치된 경우)
  - 재해에 영향을 받지 않는 위치, 필터 피폭 감소를 위한 차폐
  - HPSSPV(High Speed Sliding Pressure Venturi)형 설치 예정

## ● 한국

- 국내 표준형 및 개선형 원전은 CFVS를 위한 전용관통부 예비, 이전 건설원전은 고려 안됨
- 월성1호기는 계속운전을 위하여 국내최초 CFVS 설치 완료- 그러나 **영구정지**
  - AREVA-HSSPV 형 CFVS
  - 원자로건물 관통부 배관, 2개의 격리밸브, 벤추리 세정기(venturi scrubber)와 금속섬유필터를 포함한 벤추리 여과기 용기, 파열판, 배기굴뚝 및 관련 계측 설비 등으로 구성
  - 224kPa(a)에 도달할 때 격리밸브를 원격으로 수동개방
    - 여과기 후단과 배기굴뚝 전단에 위치한 파열판 파열(설계압력 80kPa(d))되어 외부로 여과배기
    - 이후 SAMG에 따라 수동 운전



# AREVA's Standard High Speed Sliding Pressure Venting



## Decontamination Factors(DF)

Fine aerosols: >10,000(>99.99%)

Elemental iodine: >1000(>99.9%)

Large aerosols: >100,000(99.9999%)

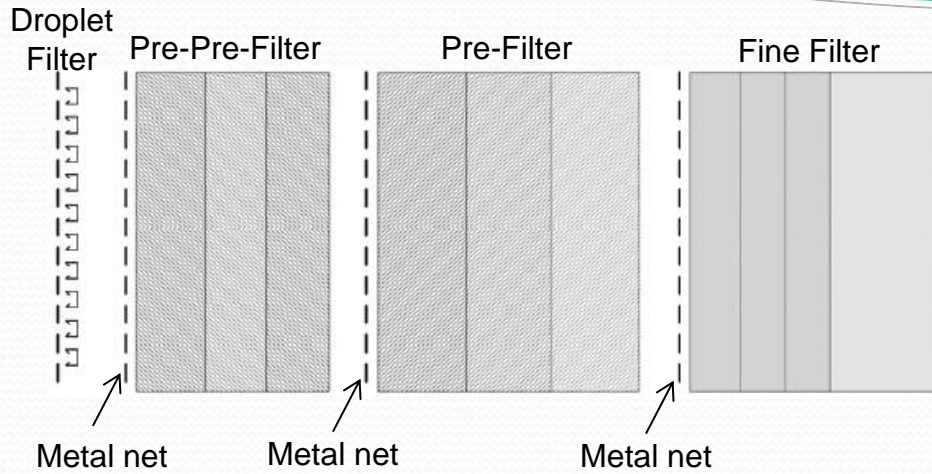
Organic iodine: >10 – 1000(>90-99.9%)

- 1단계: Venturi Scrubber (wet stage)
  - 배기가스가 scrubber의 세정용액에 잠긴 venturi nozzle들을 통과하면 배기가스의 동압  $\uparrow$ , 정압  $\downarrow$  속도차에 의해 주변의 세정액 흡입됨. 여기서 대부분의 에어로졸이 입자요오드와 대량의 요오드화합물과 함께 제거됨
- 2단계: Metal Fiber Filter (dry stage)
  - Venturi nozzle을 통과한 배기가스에 함유된 물방울, 마이크로 에어로졸 및 재부유 에어로졸 제거
- 3단계: Molecular Sieve Section(dry stage)
  - 분자체에서 가스 유기요오드가 흡착제(Adsorber)에 의해 흡착, 고온에서 유기요오드 흡착이 잘 이루어지고 재취발된 입자 및 유기요오드가 제거됨



## • 독일

- Westinghouse의 건식여과배기설비(DFM)가 7 PWR에 설치됨
- 건식필터는 금속섬유필터를 사용하여 에어로졸을 제거하는 필터와 Molecular sieve(분자체) 형태의 요오드 흡착필터로 구성
  - 금속섬유필터(Metal fiber filter)
    - 다단으로 구성되며 첫단은 큰입자, 후단은 미세입자 여과
  - Molecular sieve(분자체)
    - 원소형(I<sub>2</sub>) 및 유기요오드(CH<sub>3</sub>I)를 여과
    - Silver Zeolite 사용(일부 제품의 CH<sub>3</sub>I 흡착효율은 TEDA 침착 활성탄의 3~10배 우수하다고 알려짐)
      - $Ag + I = AgI$  (chemisorption of gas iodine)
- 요오드필터 유입 전에 습분을 제거(가열, orifice 사용)



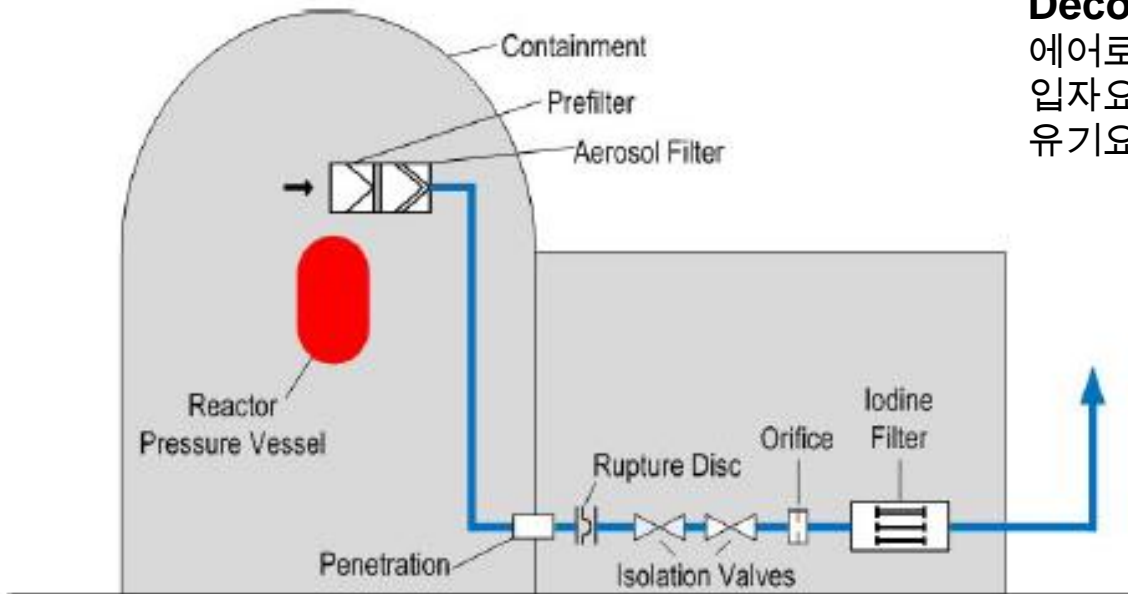
웨스팅하우스 건식  
CFVS 에어로졸필터

### Decontamination Factors(DF)

에어로졸: >10,000(>99.99%)

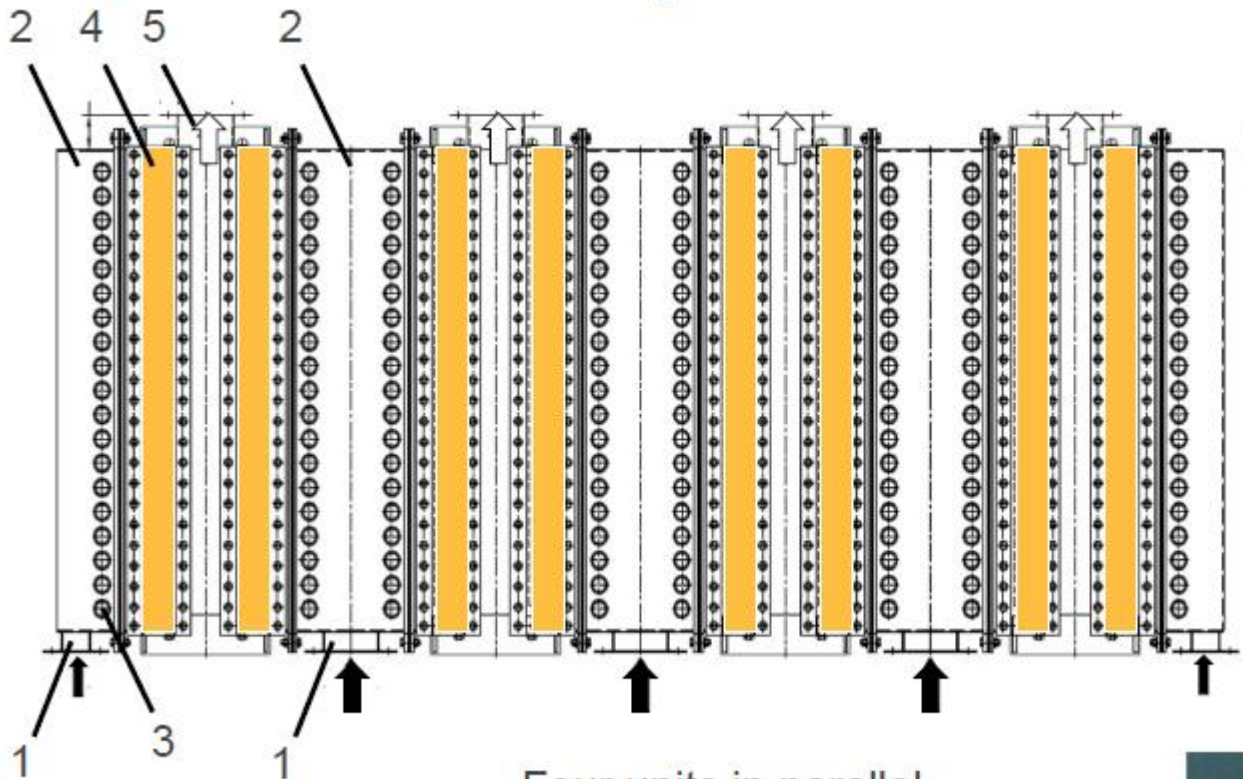
입자요오드 >1000(99.9%)

유기요오드 >40(97.5%)



웨스팅하우스 건식 CFVS의 개략도





- 1 Feed Pipe
- 2 Inlet Chamber
- 3 Cooling Tube
- 4 Zeolite Bed
- 5 Exhaust Duct

Four units in parallel



**DFM : 요오드 필터(격납건물 내부용)-평면도**

**Zeolite  
(직경 ~1mm)**



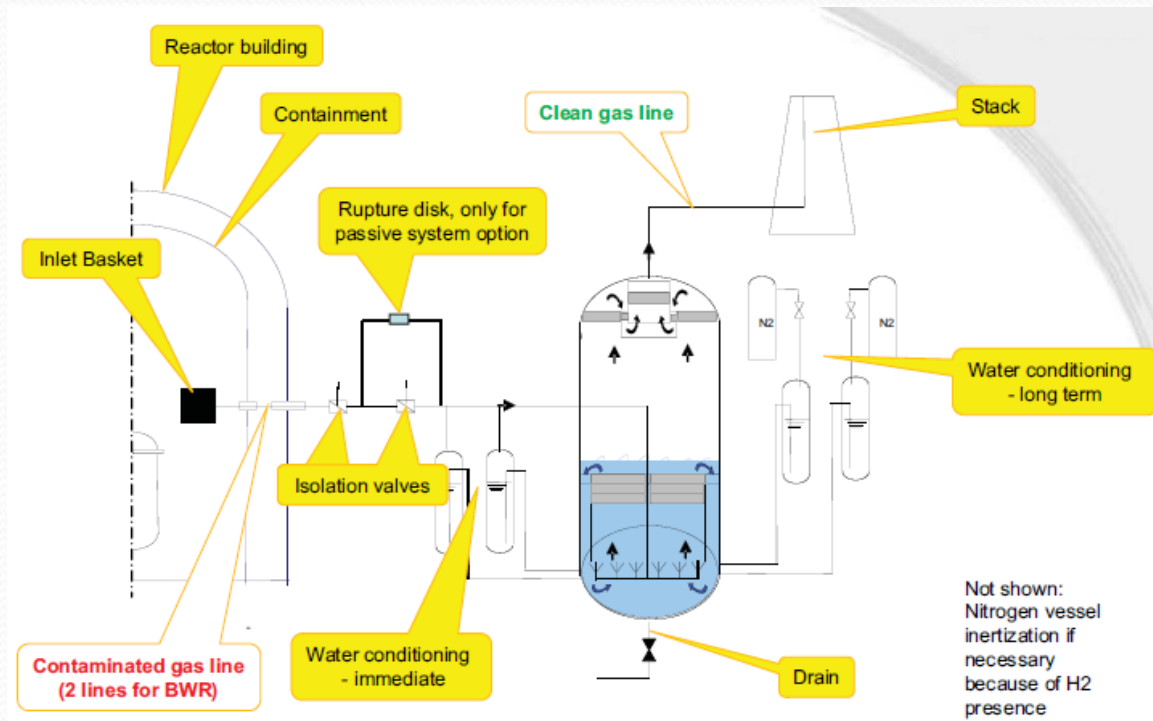
## • 건식(DFM)의 배기필터 설계

- 기존관통부(예비관통부 또는 압력시험용 관통부)를 사용
- 격납건물 격리밸브를 수동조작으로 운전개시, 파열판은 미리 설정한 압력에서 운전개시하도록 설치
- 소형으로 격납건물 내부에 에어로졸 필터 설치 가능
  - 요오드 필터는 건물 밖 보조건물에 위치
  - 장수명 핵분열생성물이 격납건물 내에 보존되어 차폐 불필요
- 최근 10년간 설치사례 없으나 일본에서 도입추진
- 금속필터는 내진 성능이 우수
- 에어로졸에 의한 필터 막힘(clogging)을 막는 설계 필요
- 각 필터에서 열부하를 처리(냉각)하는 설계 필요



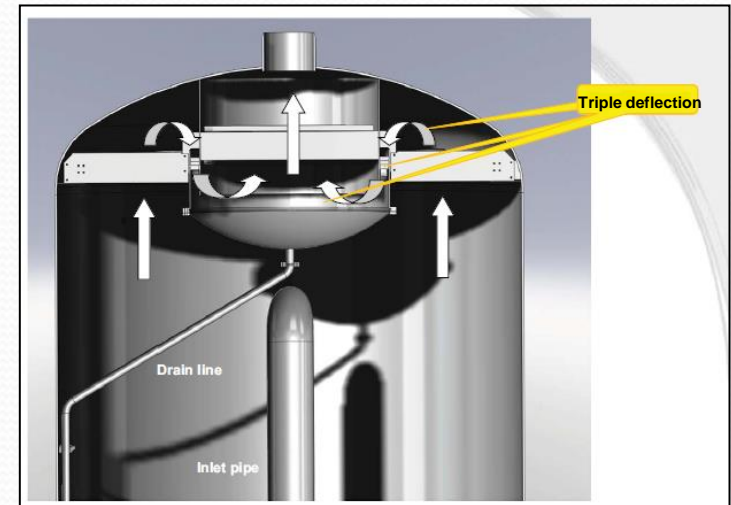
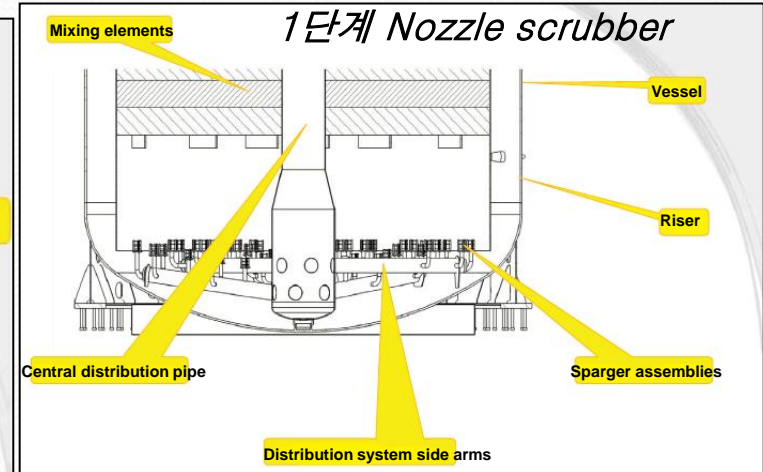
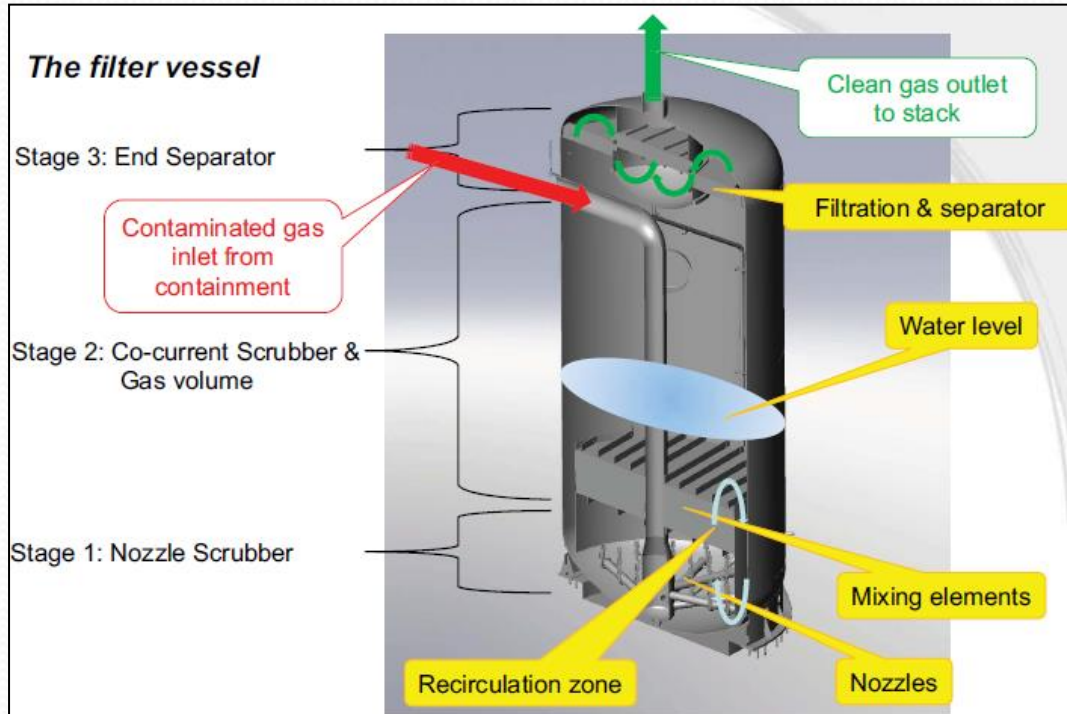
# 스위스-CCI (IMI Nuclear 자회사)의 venting system

Decontamination Factor	CCI Filter System (Gen.1)	CCI Filter System (Gen.2)
에어로졸	> 1,000	>10,000
입자 요오드	100	>1,000
유기 요오드	1	>1,000



CCI CFVS의 개념

# 작동원리



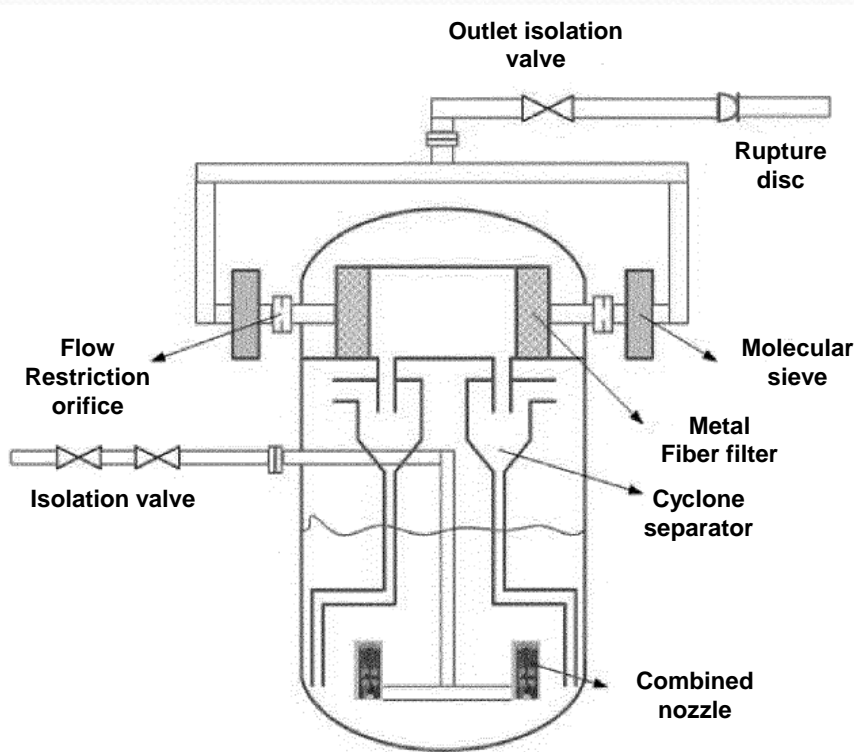
**3단계 End Separator**



## IV CFVS 국내 진행현황

- 월성 2,3,4호기의 경우
  - CFVS의 설계 건설
    - Venturi Scrubber부분의 설계는 Framatome Canada(전 AREVA)
    - 기타부분은 대우건설이 설계
    - 설계완료후 한수원이 입찰에 의해 PC부분 수행
    - 현재 인허가 진행중이나 KINS의 질의에 Framatome이 고유의 설계부분이라는 입장으로 답변이 잘 안 이루어져 인허가 질의가 지연, 금년중 인허가 완료 예정
- 경수로형 CFVS
  - Framatome과 유사한 형태로 설계중(FNC tech)가 진행중]
  - 비에이치아이가 여과기 제작 우선협상자로 선정됨
  - 설치설계 용역, PC, 대우건설?

- 국내연구중인 scrubber system
  - FNC tech(미래와도전)
    - 유럽 특허 출원중

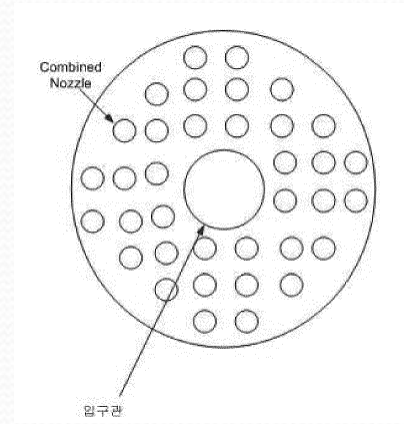
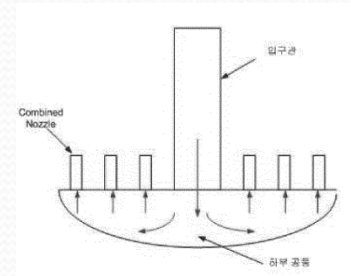
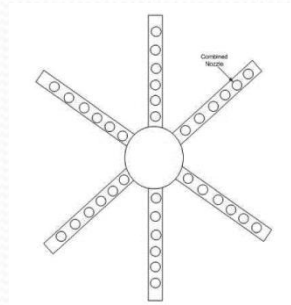
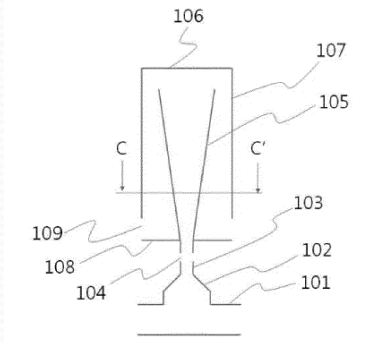


### 제원

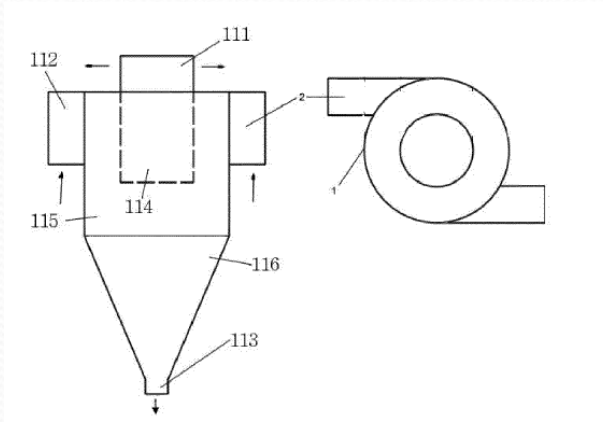
1. Isolation valve
2. Combined nozzle
3. Cyclone separator
4. Metal fiber filter
5. Molecular sieve
6. Flow restriction orifice
7. Rupture disc



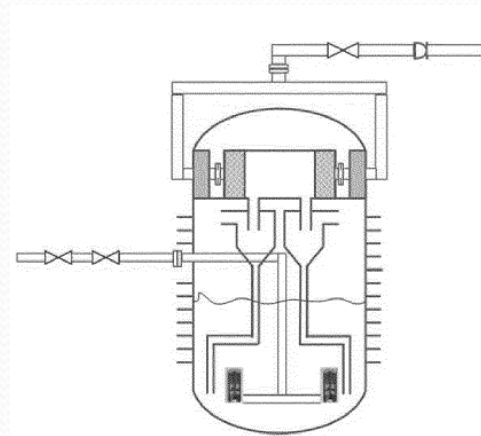
# 부속품



**Combined Nozzle**



**Cyclone Separator**



**Radiation Fins**

## • 특징

- Venturi 대신 Nozzle을 사용하며 배기가스 유로를 꺾어 세정효과 높임
- Cyclone separator를 사용하여 원심력에 의한 에어로졸 제거
- Radiation fin을 사용하여 용기의 온도 감소-에어로졸 콘덴싱효과
- 세정액 탱크에서 중력에 의한 자동 충전
- Molecular sieve를 예열하여 요오드 흡착효과를 높이기 위해 배기가스를 우회하는 설계
- Molecular sieve 후단에 carbon filter를 두어 Xe, Kr 같은 불활성가스의 배출을 지연시켜 방사능 저감효과



## V 결론

- CFVS의 설치는 중대사고시 격납건물보호 및 방사능누출 감소를 위한 필수설비로 인식되고 있음
- 미국은 CFVS 대신 Hardened Venting System
  - ASME AG-1같은 코드에 언급이 없어 KEPIC도 언급 없음
  - 규제기관은 규제요건을 연구중
- 한국은 AREVA-HSSPV형을 기설치하고 이와 별도로 개선연구 및 특허출원도 이루어지고 있음
  - 유럽과 같은 대규모의 실증실험을 할 필요
- Molecular Sieve Section(분자체)에 요오드 흡착제로 사용하는 AgX(zeolite)에 대한 기술기준 필요- 향후 KEPIC 코드 요건화?

**경청해주셔서  
감사합니다.**

**e-mail : kimminjin@ness.re.kr**