

Leibstadt 原子力発電所訪問調査

2011 年 11 月 11 日 11:00～17:00

応対者：Leibstadt 発電所 Mr. Dennis Dres(Safety/PSA), Mr. Benet Tveiten(Safety, Regulatory), Dr. Johannis Noggerach (Manager Safety Compliance, Heat Removal Ssystem), Mr. Wolfgang Heintz(Mechanical Engineering Dept., FCVS), Mr. Daniel Schupp (Operations Dept.) 他

訪問者：JSME 水町、岡本、奈良林、田島

1. Leibstadt 発電所概要

Mark III 型大型格納容器の 125 万 kW の BWR 2 基（1 号機定期検査中、2 号機 100%出力運転中）

定期検査中の 1 号機の格納容器内主要機器およびフィルタードベントシステムを見学した。図 1 に発電所の外観を示す。



図 1 ライプシュタット発電所 (KKL)

2. SEHR(Special Emergency Heat Removal System)について

a. 目的

1970 年代後半に、以下の 2 つの目的でプラントのバックフィットを行った。

- ・ 深層防護レベル 3: 冷却材喪失事故 (LOCA) 後の格納容器除熱システム (Additional Containment Cooling after LOCA)
- ・ 深層防護レベル 4: 設計基準事象を超える全 ECCS の作動不能・長期の電源喪失とヒートシンク喪失を伴う事故緩和系 (Mitigate consequences of a B-DBA: Failure of all ECCS (Long SBO or/and loss of UHS))

b. 機能

SEHR は緊急炉心冷却の機能 (SEF: Special Emergency Function) と LOCA 後の格納容器冷却 (PCCF: Post-LOCA Containment Cooling Function).

このシステムは LOCA 時に炉心の冠水 During a LOCA the SEHR system may be employed to provide make-up water to the Reactor.

The SEHR System は特設非常用機能 (SEF : Special Emergency Function) と LOCA 後の格納容器冷却 (PCCF: Post-LOCA Containment Cooling Function) を機能有する追加された施設で、長期電源喪失 (L-SBO) と (and/or) ヒートシンク喪失 (the loss of UHS)

時に以下の冷却モードで対応する。

- (1) 格納容器冷却 (CC:Containment Cooling) .
- (2) 炉心および格納容冷却 (RC&CC : Reactor Core and Containment Cooling).

C.システム構成

システム構成を図2に示す。

SEHR – Special Emergency Heat Removal System Overview: All ECCS in KKL & SBO-SEHR

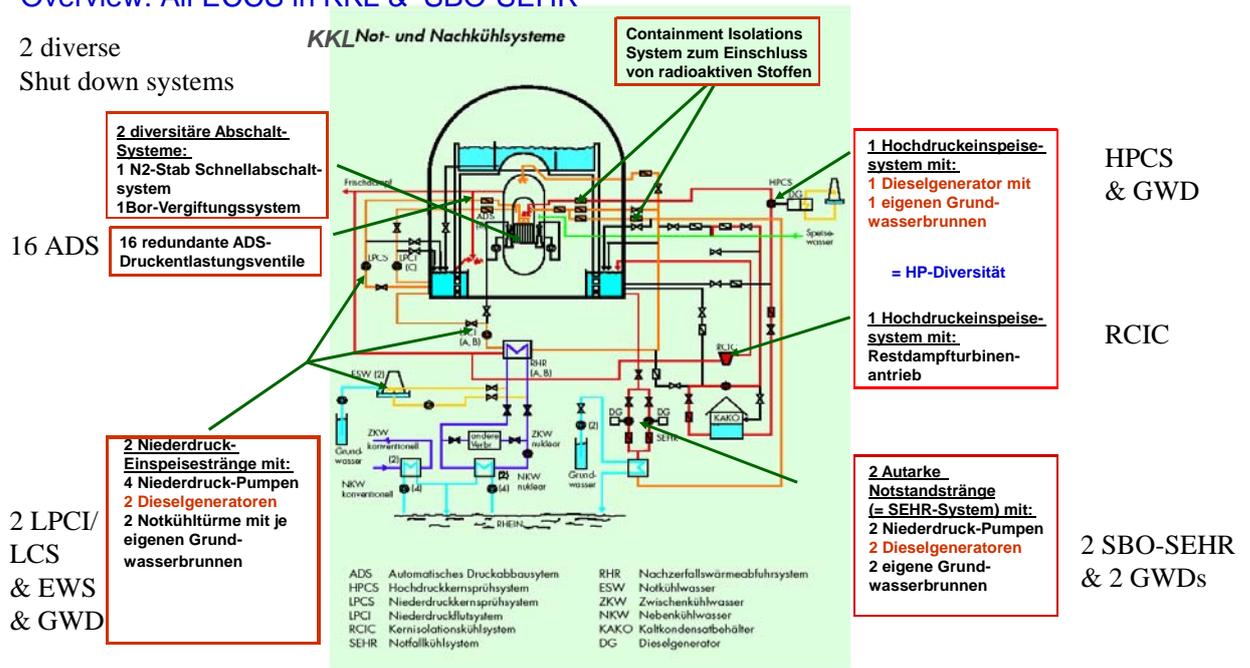


図2 SEHR(Special Emergency Heat Removal System)の系統構成 (ライブシュタット)

2つの多様な炉停止系 (N2 駆動の制御棒スクラムとホウ酸注入系) に加え、SHER (特設非常用冷却系) は、以下の冷却系から構成される。

- (1) ADS を構成する 16 個の主蒸気逃がし安全弁
- (2) 2 系統の LPCI・LCS + 2 DG (水源は復水貯蔵系 + 地下水)
- (3) RCIC (蒸気タービン駆動)
- (4) HPCS (水源は地下水) + DG(追加)
- (5) SBO 対策用 SHER (水源は 2 系統地下水) + 2 DG (追加)
- (6) 制御盤バッテリー充電用可搬電源

当初あった非常用 DG 2 台に加え、SHER 系で 3 台の DF と可搬電源を 2 台追加し、計 7 台の電源により、SBO に備えている。さらに、福島第一事故以後に、可搬電源やモータ、電源盤、コンプレッサー、ポンプ、ケーブル、電源用燃料などの緊急機材を日本円で約 8 億円購入し、軍の施設に預けてある。サイトの電源や電気品がやられても、速やかにサイトに運搬され、軍の支援のもとで、迅速な復旧作業が行われる体制を構築した。

d. SEHR システムの特殊非常用機能 (SEF) モードの仕様

SEHR システムを特殊非常用機能 (SEF) モードで使用する場合は、それを阻害する人的介入を防止するように SEF モードに限定 (locked in) される。SEHR システムの SEF モードは **PSA Level 2 (Beyond-DBA)** を考慮した設計となっている。このシステムの主な設計基準は以下の通りである。

- (1) SEHR は SEF モードを自動起動し、10 時間にわたって作動する容量を有する。SEHR は SEF モードで 10 時間作動した後は、運転員の手動操作により更に運転継続できる。
- (2) SEHR は SEF で作動する場合、10 時間の自動作動を含めて動的機器の単一故障を考慮するとともに、電気系の動的単一故障と静的機器の単一故障を考慮している。
- (3) SEHR は自動減圧系(ADS)の作動に続いて被覆管の最高温度が許容値以下になるような十分な冷却能力を有する。これは、LOCA 時の米国の安全設計基準である US 10CFR 50.46 を満足する。
- (4) SEHR は ADS 作動後の圧力抑制プールの最高到達温度が許容値以下となるように設計する (The maximum suppression-pool temperature at termination of reactor blowdown through the ADS to acceptable limits)。
- (5) SEHR システムは SEHR の一部のシステムの故障や相互干渉が発生しても不具合を拡大させたり影響を受けない設計とする (Failures in the interfacing systems shall not propagate to, or affect the performance of, the SEHR system)。
- (6) SEHR システムは LOCA 後の格納容器冷却機能を、地震による安全停止時および停止後にも維持する (Designed to withstand and be capable of functioning properly during and following a safe-shutdown earthquake (SSE) in order to provide the post LOCA containment cooling function)。
- (7) SEHR システムは以下の外的独立事象に対して全ての機器と配管が健全であること (All components and piping are capable of functioning during and following the non-coincidental external influences) :
洪水、地震、火災、部外者の破壊工作 (floods, earthquakes, fire and third party actions) .
- (8) SEHR システムは SEF モードの作動を、火災時および火災後にも機能するように防護すること (Protection against fire and continue operation during and following a fire) .
- (9) SEHR システムは、図4に示すように、耐震クラス I の専用建屋に収納し、地下の防護室を設けて、火災、航空機衝突、洪水などの外的事象に耐えること (System is housed in a dedicated bunker that has been designed and built to Seismic Category I. The bunker is designed to protect the housed equipment from external fires, aircraft crash penetration and any detrimental effects of floods) .

3.Filtered Containment Vent System(FCVS)について

a. 目的

シビアアクシデントのシナリオの中で、PCV 過圧破損および過熱破損を防止するためのベントシステムで、ラプチャーディスクまたは、電動・手動弁により放射性物質のヨウ素、セシウムをフィルターで濾過し、ベントする。これにより、格納容器破損に伴う放射性物質の飛散のリスクを 1/100 から 1/1000 に大幅低減する。

b. 系統

① 吸入部

格納容器内部には、ベントのための金属性の金網で目詰まりを防いだ2つの排気系の吸い込み部が設置されている。また、格納容器天井には複数のイグナイターが設置してあり、発生した水素を早期に酸素と反応させる配慮がされている。

② ベントバルブ

ベントラインには、2個の電動弁（常時閉のバタフライ弁）がシリアルに付いている。このバルブは図5に示すとおり、現場に設置されたベント手順書に従い、事故時には離れたところから電動兼手動のハンドルを回すと数 m の長さのシャフトによりウエットウエルの熱で靴底が溶けたり、放射線の被曝をすることなく、安全に弁を開けることができる。この操作場所は格納容器の外側でベント系の配管からもコンクリート壁によって遮蔽された特別な部屋である（図1 1左図）。ロックチェーンの鍵はマネージャーが管理している（鍵がないと弁は開けられない）。

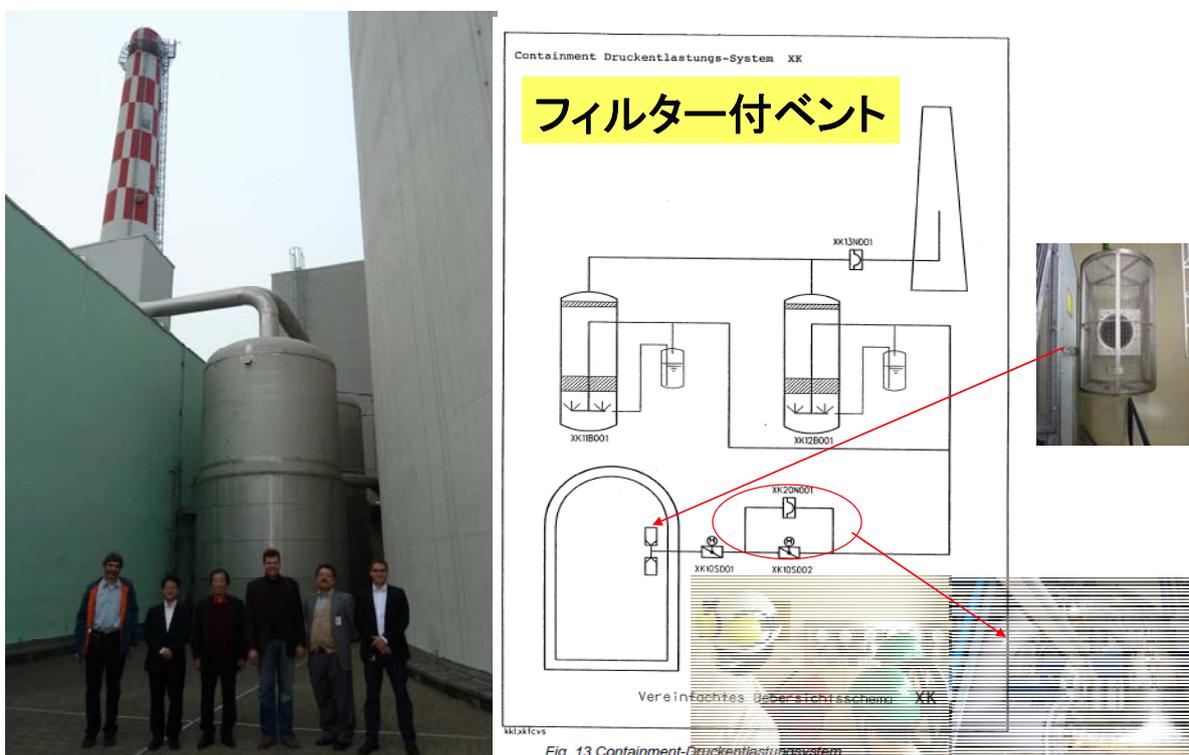


図5 フィルター付き格納容器ベントシステム (FCVS: Filtered Containment Venting System)

③ フィルター

フィルターは、図8の系統図に示すとおり、直径4m、高さ8mの円筒形容器が2基あり、内部には水が充填され、事故時にはベント系の圧力上昇により水酸化ナトリウム(NaOH)が注入されてPH=10のアルカリ水溶液となる。これにより分配係数DFが50倍に上昇する。図9に示すように、容器の下部に配管でベントした蒸気、放射性物質(FP)、水素などの混合気体が導かれ、枝状のヘッダーに取り付けられた多数のノズルから、微細な気泡となって水中に吹き出す。気泡にしているのは気液界面の面積を大きくし、併せて上昇する気泡の攪拌効果によって水中に放射性物質を移行させる。なお、ヨウ素やエアロゾルなど水に溶けにくいFPは、薄い波板に凹凸のエンボス加工をしたステンレス板を隙間を開けて重ねたミストセパレータによって、水滴やエアロゾルを吸着・分離する。このミストセパレータは、フィルタードベントの容器のほぼ中央の高さに設置してある。

④ ベント配管

スタック内にベントラインが独立して設けられている。ラプチャーディスクの手前の弁は常時開いているので、格納容器の圧力が設計圧力に達するとラプチャーディスクが破れて、ベントが自動的に実施される。所長の指示も総理の判断も不要である。SGTSとのラインの共用も無いので、SGTS周りの空気作動弁を手動で閉める必要は無いし、換気空調系を逆流して、原子炉建屋内にFPや蒸気が逆流することも無い。

表1 福島第一発電所の格納容器破損状況と FCVS の目的

(1) Preventing C/V rapture
 (2) Preventing Radioactive material exhaust

Fukushima Daiichi NPP

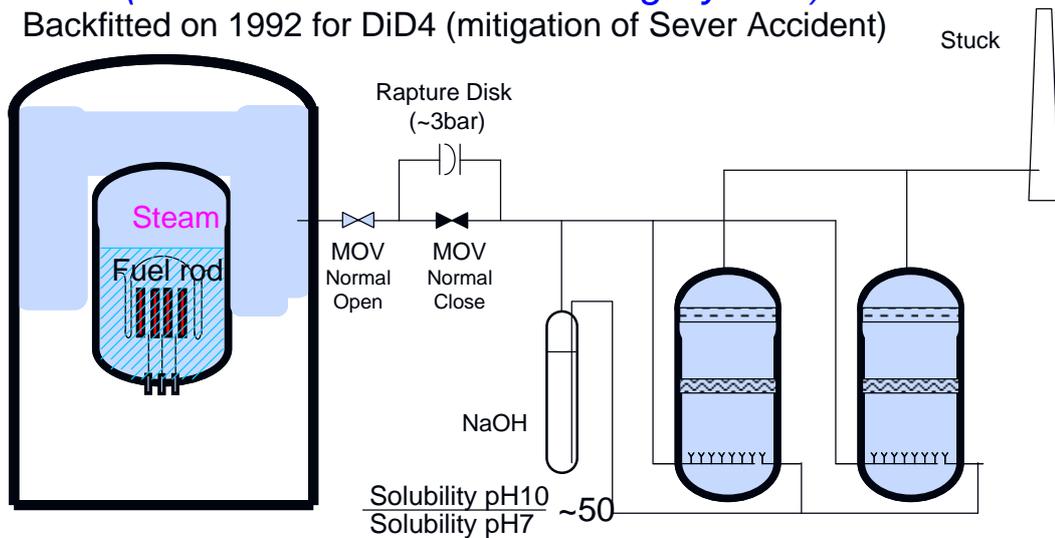
#1	C/V 7bar + Vent + H ₂ Explosion	~1day
#2	C/V 7bar + No Vent + C/V rapture	~3.5day
#3	C/V 6bar + Vent + H ₂ Explosion	~3day

Prevent **over-pressure** C/V rapture + Exhaust of RI and H₂
 → Filtered Containment Venting System (FCVS)

Prevent **over-temperature** C/V rapture + H₂ leakage
 → Special Emergency Heat Removal System (SEHR)

FCVS (Filtered Containment Venting System)

Backfitted on 1992 for DiD4 (mitigation of Sever Accident)



Prevent C/V overpressure failure
 Capture radioactive materials
 Feed and Bleed under Long SBO & LUHS

DF > 1000 aerosol
 > 100 I₂

図7 フィルター付き格納容器ベントシステム (FCVS) の概略系統図

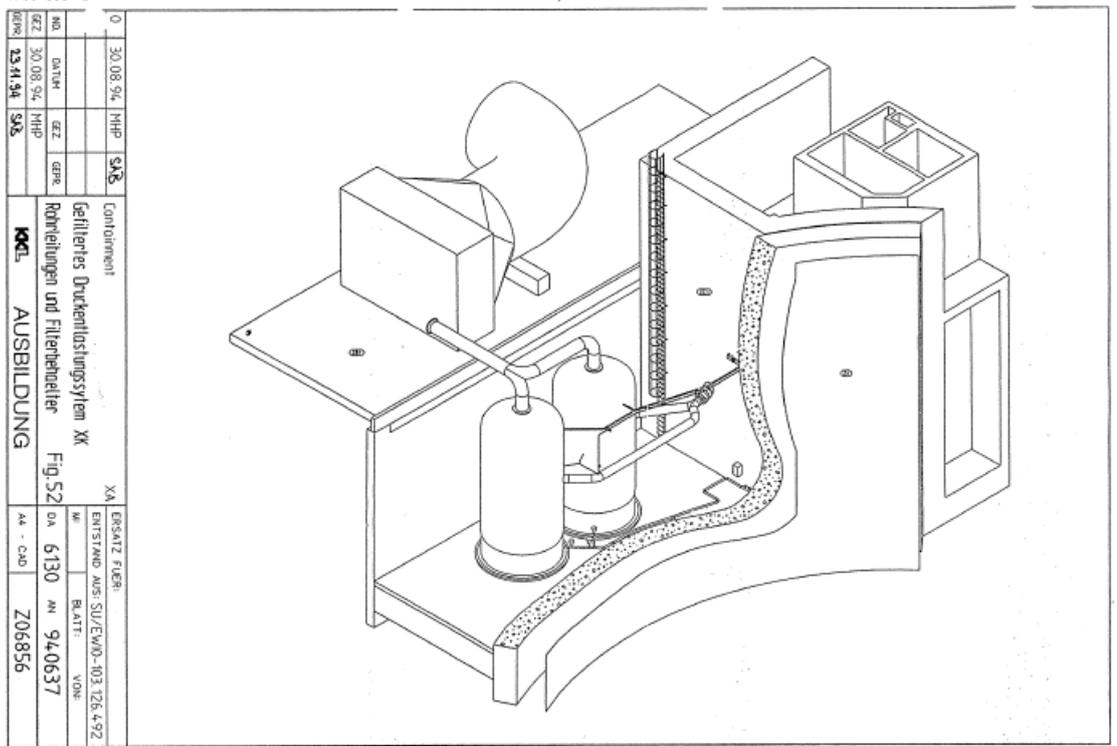


図 1 0 FCVS の主要機器の設置状況

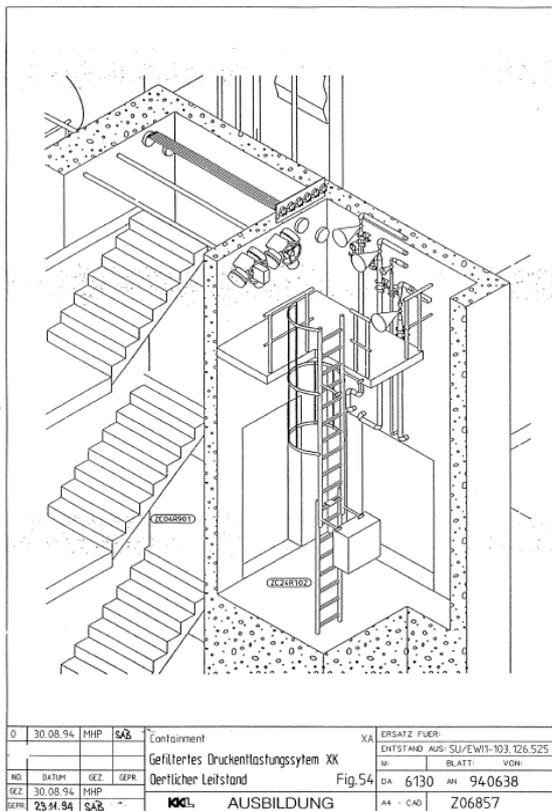


図 1 1 FCVS の手動弁の操作室

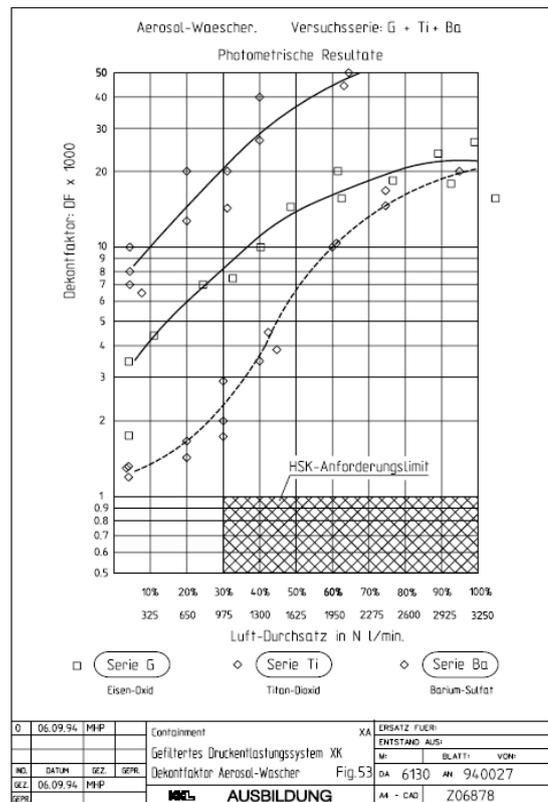


図 1 2 FCVS の分離性能データ

4. 設置基準と起動クライテリア

FCVS の設計仕様を表 2 に示す。耐震設計は SSE (10⁻⁴/y、310gal)、崩壊熱 1% (37.5MWth)、3.1BarAbs (0.31MPa)、134.7°C、FCVS の作動容量は 50%×2 基で、最低蒸気流量は 17.36kg/s ある。1988 年に規制要求が出され、1992 年に規制要件 (バックフィット) となった。

FCVS の起動は、極めてシンプルである。図 1 2 のように運転員が弁などを操作しなくても、ラブチャーディスク (破裂円盤) が格納容器の内圧上昇により設計圧力に達した段階で割れて、ベントフィルター (スクラバー) により FP を濾過して、排気塔からベントする。

表 2 FCVS の設置目的と設計仕様

FCVS: Objectives and Design

Generally: Mitigate consequences of a B-DBA: Failure of all ECCS (Long SBO or/and loss of UHS)

The main design basis aspects are:

- FCVS is classified as Seismic Category I and is designed to remain functional during and following the SSE (1E-4 y: 0.31g PGA + safety margin).
- FCVS complies with the requirements of HSK AN-2026, Rev 1, “Filtered Venting for the Contaminants of Light Water Cooled Reactors – Design Requirements”, that is at 1% decay heat, 37.5 MWth, 3.1 bara, 134.7°C, provide a minimum flow rate of 17.36kg/s

Filtered Containment Venting System

Required by ENSI/HSK in 1988,
backfitted in 1992
Vendor: Sulzer-CCI

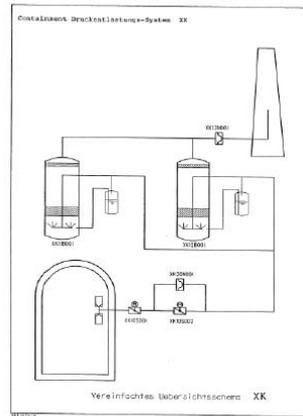
- Defense in Depth Level 4: Mitigate consequences of a B-DBA: Failure of all ECCS from a Long SBO or/and loss of the Uninterrupted Heat Supply (UHS, Rhine & groundwater)

The Filtered Containment Venting System (FCVS) safety-related functions are:

- Controlled venting of the containment atmosphere to protect the containment from an overpressure failure during an accident that exceeds the design basis.
- Retention of a portion of the radioactive aerosols (min. Decont. Factor 1000) and elementary iodine (min. DF 100) from the containment to minimize off-site dose (retains up to 150 kg of aerosols without loss of filter efficiency)
- Able to provide continuous containment “feed and bleed”-functionality after a Long SBO & Loss of UHS. Removes post operation decay heat of 37,5 MWt (= ca. 1% nom. power, after ca. 6 -10 h) from the suppression pool → containment → FCVS. Avoids severe contamination of the surrounding.

FCVS の起動基準 (クライテリア) を図 1 4 に示す。スイス規制当局 HSK の定めた R-42 の基準により、①絶対圧力 2.25Bar (0.225MPa) 以上、②絶対圧力 2.25Bar (0.225MPa) 以下の圧力であっても格納容器内水素濃度 6%以上でベントする。

FCVS: Simplified Schematics:
containment → rupture disk → filter scrubbers → stack



Japan Delegation 2011-11 -11

Kernkraftwerk Leibstadt

Folie 4

図 1 3 FCVS の起動

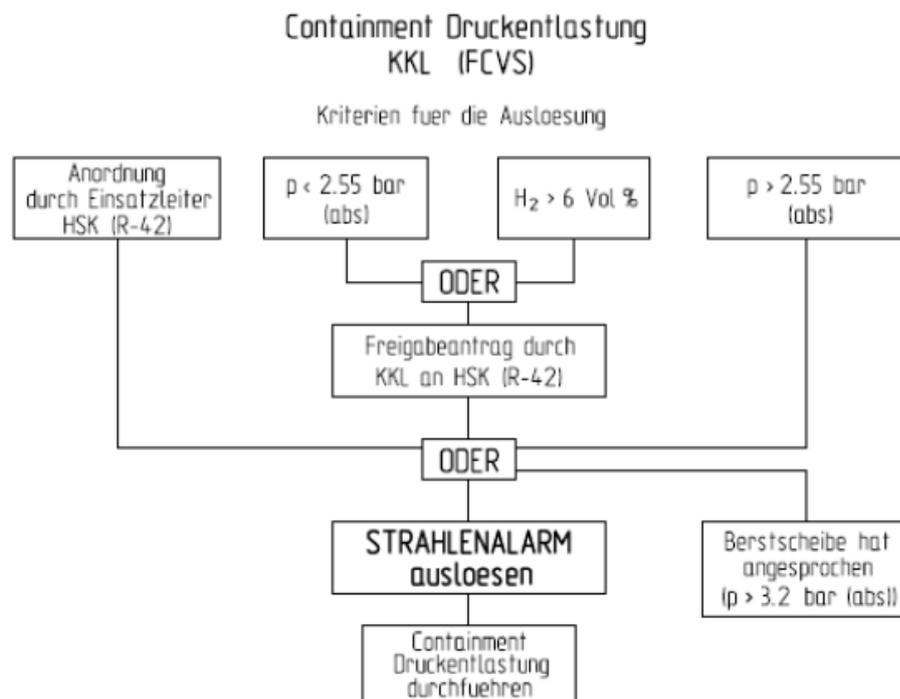
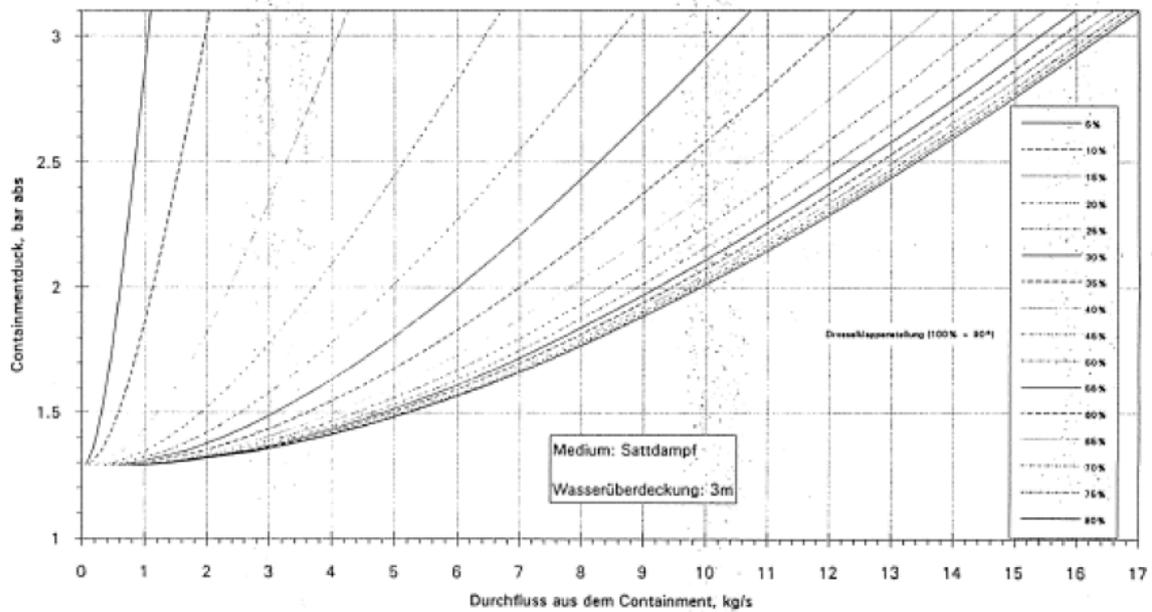


図 1 4 FCVS の起動基準 (クライテリア)

②の場合、ラプチャーディスクが破裂しないので、ラプチャーディスクに並列に入れた電動弁を開ける。SBOの場合で制御盤による遠隔操作やMO弁を駆動する電源も喪失した場合は、延長シャフトによる手動ハンドル操作でベントする。

図15はベントフィルターの流動特性である。ベント時の蒸気の質量流量と湿り度別の発生差圧で、スクラバーの水没水位3mの場合のデータを示している。

FCVSを設置する場合には、流動特性を詳細に把握しておく必要がある。



Charakteristik des Systems - Durchfluss = F(Containmentdruck) bei ausgewählten Drosselklappenstellungen

図15 FCVSの流動特性（ベント時の質量流量と湿り度別の発生差圧、水没水位3m）

5. 日本のBWRに対する提言

全体としてのリスク評価を実施し、フィルター付きベントシステムの有効性や性能目標や耐震設計などの設置基準を至急検討し、フィルターエレメントの性能を定量的に測定する必要がある。過去のリスク評価は内的事象のみを考慮していると考えられ、地震津波などの外的事象を考慮した場合のベントの有効性について至急検討する必要がある。

なお、LeibstadtはBWRであっても、BWR/6でMark-III型の大きな遮へい容器があり、ベント弁の手動操作やラプチャーディスクの信頼性など passive なベントのあり方について考える必要がある。特に、電気が全て失われた場合にも、外部への放出を1/1000に抑えることができるのは、地元への被害（ハザード）の最小化という点で非常に有効であると考えられる。