

유럽은 한 나라



趙 滿

〈韓國에너지研·高速爐研究室長〉

세계의 고속증殖爐開發體制는 미국, 소련, 일본, 유럽의 4極體制로 定着되어 가고 있다. 우리나라의 利用效率를 輕水爐對比 60倍 높혀 人類를 uranium 資源 枯渴이라는 심각한 問題로부터 완전히 解放시켜 주고 熱·電氣變換效率 또한 30% 向上시켜주는 高速증殖爐는 大容量·高效率의 動力發生裝置를 渴求하던 高度成長産業社會의 촉망받는 開發對象이 되었다.

먼저 만들기만 하면 팔린다는 熱氣속에서 유럽各國이 경쟁적으로 獨自開發路線을 追求하여 왔다.

이와 같은 경향은 서독이 벨기에, 네델란드 합작으로 原型爐 SNR-300을 건설할 때까지 이어진다. 表 1의 DFR, Rapsodie, KNK-II, PEC와 같은 實驗爐 PFR, Phenix와 같은 原型爐까지 獨自開發路線 追求의 産物이다.

輕水型爐로 대표되는 熱中性子爐의 실용화는 經濟性優位를 확보키 위한 大容量化로 高速증殖爐의 개발방향을 特徵지어져 나갔다.

非加壓의 스텐레스 스틸 원자로용기, 核燃料 交換施設, 原子爐 上部 構造物, 나트륨 淨化裝置, 爐緊急停止系統, 崩壞熱 除去系統 등과 같이 容量에는 단계없이 기본적으로 구비하여야 하는 機器, 中間熱交換系統 또한 混合酸化物 核燃料

成型加工과 再處理와 같은 核燃料週期施設은 scale merit가 큰 시설물이다.

이와 같은 大型化趨勢는 各國의 負擔能力을 상회하는 개발비와 폴루토늄과 같은 素材調達을 필요하게 되어 2國間 혹은 3國間 事業으로의 國際化의 길을 걸어 그림2와 같이 하나의 目標을 追求하는 組織體로 변모하여 나갔다.

이와 같이 거대한 유럽에 있어서의 고속증식로 개발을 共同研究開發部門과 建設事業部門으로 나누어 2회에 걸쳐 살펴보겠다.

IAEA주최 “고속증식로의 경험과 장래전망”에 관한 국제심포지움에서 발표된 자료를 정리하여 공동 연구개발부문을 살펴보면 다음과 같다.

研究·開發計劃

유럽 6國, 20個地域에 분산되어 있는 13個 研究機關에서 約 2,600名의 科學技術者가 共同 參與하는 巨大한 研究開發計劃을 구체화하였다.

1985년 유럽 各國이 供與한 研究開發費는 總 2억3천5백만달러로서 英國, 7천2백만달러, 프랑스 6천3백4십만달러, 서독 5천2백5십만달러, 이태리 3천4백7십만달러, 벨기에 7백5십만달러, 네델란드 5백만달러 등 美化로 分擔한 유럽공동 연구개발비는 같은 해 미국의 1억8천6백만달러

〈表 1〉 유럽의 高速增殖爐 施設現況

시설명 항 목	RAPSODIE	KNK II	P E C	D F R
소 재 지	Cadarache, France	Karlsruhe, FR Germany	Brasimone, Bologna, Italy	Dounreay Scotland, UK
설 계 / 건 설	CEA, GAAA의	INTERATOM	ENEA, NIRA / NIRA	UKAEA / J. Thompson
소유주 / 운전자	CEA	KfK / KfG	ENEA	UKAEA
목 적	LMFBR 운전시험, 핵연료 및 재료 조사시험시설	고속조사시험시설 운전 및 실험시험 조사시험시설	핵연료 시험시설	LMFBR 운전시험, 핵연료 및 재료조사 시험시설
출력 { 열 출력 전기출력	20 (24)MW (th) FORTISSIMO:40MW (th) ○	60MW (th) gross:21.4MW (e) net : 17.8MW (e)	123MW (th) ○	60MW (th) (노심) 12MW (th) (외포부) 15MW (e)
열전달 계통 { 1 차 2 차 3 차	Na - 2 loops Na Air	Na - 2 loops Na H ₂ O Steam	Na - 2 loops (Semi in Na tegrated Air	NaK (24loops) NaK H ₂ O Steam
원 자 로 심	PuO ₂ /UO ₂	Two-Zone 노심 :	Pu/U 산화연료 (30%Pu, U 농축 11%)	U alloy (45% 농축)
노 심 외 포 부	감손 UO ₂	내부시험영역:PuO ₂ /UO ₂ 외부driver영역:UO ₂ 연료	Ni 반사체	천연U 외포부
현 상 태	가동정지	운 전 중	건 설 중	가동정지
略 史	1958-62 설계 1962 건설시작 Jan. 1967 초기임계 Mar. 진출력운전 1970 개량 및 확장 1971-78 40MW (th) 운전 1978 1 차 Na 소량 누출 Jan. 1982 Nitrogen 소량누출 End of 1982 최종정 지 결정 May. 1983 EOL 시험	1972-74 KNKI 운전 1975-77 KNKI 을 KNK II 로 재건설 Oct. 1977 초기임계 1978 저출력시험 Mar. 1979 KNK II / 1 노심 진출력 운전시작 Jan. 1983 KNK II / 2 노심 운전시작	1966 ENEA (CNEN) 개념설계결정 1974 건설허가 1976 건설시작 1981 실험 loop 거의 완성 1983 tank내에 grid 장치	1955 건설시작 Nov. 1959 초기임계 1960-1961 영 및 저출 출력 실험 (11MW (th) 까지) Jul. 1962 Mark-III 노심삽입 Aug. 1962 30MW (th) 도달 Jul. 1963 설계출력 도달 Mar. 1977 최종가동 정지

에 비해 5천만달러가 많은 것이 되었다.

R & D 프로그램은 주로 原子爐 設計者의 要請을 充足시키는 方向으로 設定되게 된다. 따라서 現在로써는 SNR-2, SPX-2, CDFR 設計 · 建設에 쓰이는 R&D에 주력하게 되고 優先順位는 建設順序가 決定되는대로 이에 따라 정하여진다. 당연히 上記 原子爐 共通의 各項目이 주종을 이루고 特定 原子爐 固有의 特性關聯研究項目이

그 다음이 되며, 현재의 建設計劃에는 直接的으로 반영되지는 않으나 長期的으로 보아 집고 넘어가야 할 課題도 약간은 포함되도록 調整되고 있다.

프랑스와 서독의 설계팀으로부터 제출받은 S NR-2用과 SPX-2用에 필요한 R&D項目을 比較檢討한 바 約 70%는 같은 내용의 共通課題임을 確認할 수 있었다.

研究의 主目的은 經濟性向上을 위한 建設費低減

PHENIX	SNR 300	PFR	SUPER PHENIX- I
Marcoule France	Kalkar, Lower Rhine, FR Germany	Dounreay, Scotland, UK	Creys-Malville France
CEA, EdF, GAAA	INB / SBK	UKAEA	NOVATOME, NIRA
EdF	SBK	North of Scaland Hydroelectric Board	NERSA
LMFBR 원형로 운전경험	원형로 LMFBR의 상업로 허가조건에서의 운전경험	원형로 LMFBR의 운전경험	준상업로 LMFBR 운전 경험
563MW (th) Gross : 254MW (e) Net : 238MW (e)	770MW (th) Gross : 327MW (e) Net : 295MW (e)	600MW (th) 270MW (e) 254MW (e)	300MW (th) Gross : 1.242MW (e) Net : 1,200MW (e)
Na loop Na H ₂ O Steam	Na 냉각 3 개의 병렬열전달 계 통 Steam : 16MPa, 495°C	Na - pool 형 Na H ₂ O Steam (16.2MPa, 516°C)	Sodium cooling pool type 4parallel circuit System Steam : 17.7MPa, 487°C
혼합산화연료	혼합산화연료	혼합산화연료	혼합산화연료
UO ₂	UO ₂	UO ₂	UO ₂
운전중 1968-1973 건설 31Aug. 1973 초기임계 14Jul. 1974 상업운전 1976-77 IHX 보수를 위 해 일시정지 Mar. 1978 IHX 보수완료 1982 S/G 보수 Dec. 1982 운전중	1985/1986 건설완료 1966 최초 설계개념상정 1969 DeBeNe 협력 1973 건설시작 1978-80 건설을 지연시키 는 정치적, 인허가문 제 발생 1984 노심부분 제작완료, 열전달 계통장전 및 시험	운전중 1966-73 건설기간 Mar. 1974 초기임계 Feb. 1975 T/G 가동 Jul. 1976 100MW (e) Feb. 1977 전출력 도달	건설완료, Startup 1971 설계 및 안전기준 확정 1973 agreement (불·이· 독) 1975 DSAR 제출 1977 건설시작 1981 Sodium 취급 1984 원자로 완성 1985 Startup

對策과 Public Acceptance의 向上 두고 있다.

이들 공통의 各項目에 대하여 그림 2와 같이
分擔된 各 專門部會에서는 關心度(Degree of
Intent)를 6段階로 분류하여, 各國 R&D機關의
의견을 모아서, 이를 토대로 하여, 어느 R&D
를 어느 곳에서 실시할 것인가를 조정하고 調整
委員會의 決定을 기다린다.

이와 같은 方法으로 R&D 分擔이 決定되고 나
면 R&D計劃, 豫算과 Time Schedule을 정해진
書式에 따라 기입하게 된다. 이를 每6個月마다
中間進行報告書로서 技術事務局에 제출하면 調整
委員會에서는 이를 研究管理에 參照하면서 次
後 研究·開發計劃을 調整하여 나간다.

이렇게 하여 결정된 R&D計劃 가운데 주된 것

을 各 專門部分別로 整理한 것이 표 2와 같다.

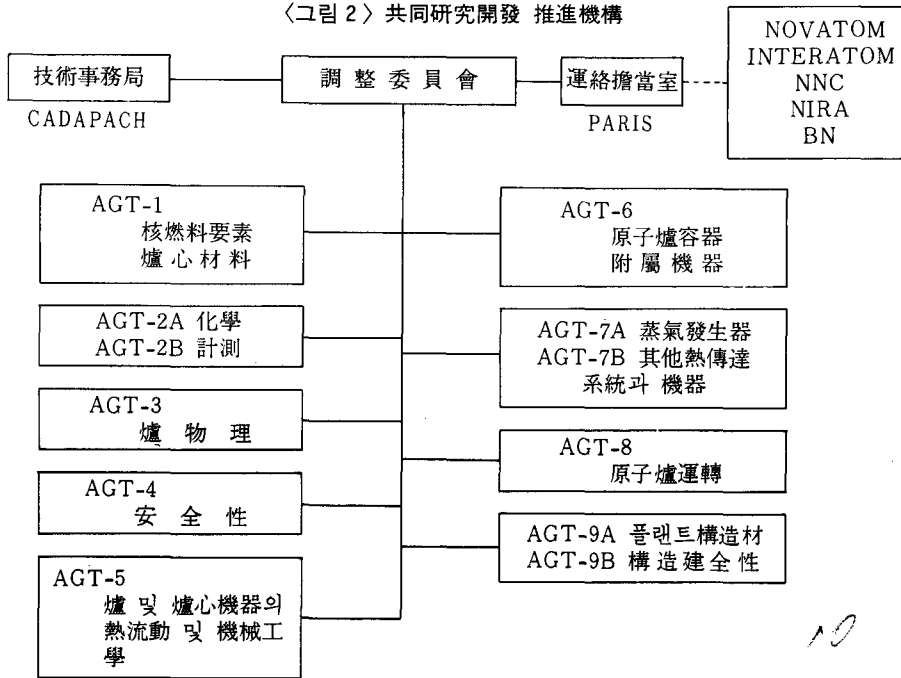
核燃料의 開發

1) 高燃焼度の 達成은 發電單價低減에 直接
의으로 寄與한다. 現在까지 達成된 燃焼度는
80,000~100,000MWd/t로써 目標値는 150,000~
200,000MWd/t이다. 이에는 150~180dpa의 高
照射度에 견디는 核燃料棒被覆材와 集合體 Wr-
apper素材의 開發이 있어야 한다.

SNR-300, Phenix, SPX-1에 쓰이고 있는 type
15/15나 316 Austenitic Steel은 暫定的인 것으
로 생각하고 있다. 이의 有望한 素材로는 다음
과 같은 것이 試驗되고 있다.

가) CEA-Inconel 706, DeBeNe-10Cr/25Ni, U

〈그림 2〉 共同研究開發 推進機構



〈표 2〉 전문부회별 공동과제 연구계획

전문부회	
AGT-1	- Phenix에서의 SNR- II 연료집합체 照射 - DEBENE와 프랑스 핵연료 피복에 比較를 위한 조사시험 - 材料試片의 PFR에서의 照射
AGT-2	- KASU MOS 核燃料破損檢出장치의 Phenix와 KNK- II 에서의 on-line 試驗
AGT-3	- 大型臨界實驗裝置를 利用한 核의特性의 測定 - 유럽공통의 핵자료와 不均수의 작성
AGT-4	- CABRI 置疫實驗 - PFR 조사핵연료의 TREAT 과도실험에서의 결과 평가
AGT-5	- 自然對流에 의한 崩壞熱除去能力性能試驗 (모델을 이용한)
AGT-7	- 蒸氣發生器 누설검지장치시험
AGT-9	- 원자로 기기에 미치는 動的荷重컴퓨터 code 정비

K-PE16과 같은 고니켈합유合金

나) 分散型強化韃라이트(CEA/DeBeNe共通)

다) 集合體 Wrapper用 耐 Swelling性이 강한 말텐사이트素材(CEA-EM10, DeBeNe-

1.4914, UK-Fr448)

2) 定常狀態下에서의 核燃料舉動은 充分히 알려져 있으나 非定常運轉條件下에서 核燃料棒이 어떻게 舉動하는가는 잘 알려져 있지 않다.

直徑과 길이의 變化, 부분적인 용융 核燃料棒의 破損도 發生될 수 있는 過渡, 過出力, 過渡溫度를 經驗케 하는 研究가 各國에서 이미 開始되었다.

일단 그와 같은 파손이 惹起되었을 경우 핵분열 생성물의 냉각재내 방출, 플루토늄損失, 冷却材와의 相互作用, 核燃料機間 破損傳播等 現象의 究明을 위한 파손핵연료의 거동추적은 중요한 연구과제가 된다. 이와 같은 실험은 MFR Petten, BR2, SILOE와 같은 研究爐와 KNK- II 와 같은 高速實驗爐에서 爐內實驗으로 수행되고 있다.

3) 集合體內 냉각유로 확보를 위하여 현재 쓰이고 있는 方法은 프랑스의 wire wrapping方式과 DeBeNe와 英國의 grid spacer方式으로써 100,000 MWd/t까지의 실적은 만족할만하다. 그러나 이

의 統一을 위하여 그중 하나를 선택하기 위하여는 같은 조사조건하에서의 비교시험을 하여야 하기 때문에 SNR-2 grid연료와 SPX-2 spiral wire (Saphir) 핵연료의 比較照射가 phenix에서 CEA, DeBeNe 공동연구로 수행 중에 있다.

나트륨化學과 計測

1) 핵연료, 원자로용기, 냉각계통 파손의 適期檢知와 發生位置檢出, 서베이린스가 계측분야의 주목표가 된다.

패턴認識方式을 이용한 자동자료처리 방법을 개발중에 있다. 첨단 컴퓨터를 이용한 人工智能, 專門家 시스템의 개발을 통하여 熱電帶, 流量計, 遲發中性子 檢出器 등으로부터 보내어지는 플랜트 파라미터를 운전원이 쓰기 쉬운 모양으로 처리하여 제공토록 개발중에 있다.

사용중 검사기간에 非透明의 나트륨내 조작을 위한 超音波機器를 開發하므로써 검사기간의 단축을 기하고 있다.

2) 어느 정도의 파손핵연료가 爐內에 있는 상태에서 爐內保持力이 強하기 때문에 발전소 종사자의 피폭선량을 충분히 낮게 유지할 수 있음이 나트륨 냉각고속증식로의 운전실적을 통하여 立證되어 있다. 앞으로의 계획으로는, 초음파탐지기, 나트륨누설탐지기, 나트륨淨化器 cold trap의 再生, 핵分裂生成物の 放出 등에 관하여 SPX-1과 같은 大型爐에서의 實證實驗이 있다.

그 밖에 各國이 제출하고 있는 연구과제는 SPX-2에서

- 사용중 검사로써
노심지지 구조물 사용중 검사장비
..... CEA, DeBeNe
노내구조물 사용중 검사장비
..... CEA, UK
- 중성자검출기의 성능시험
..... CEA, DeBeNe
- KNK- II에서의 照射시험 UK

- SPX-1起動試驗中 반응도가 지시기
..... CEA, DeBeNe
- 水素檢出器 CEA, DeBeNe
SNR-2에서
- 肉眼檢査法의 최적화 ... ENEA
- 나트륨내 透視裝備의 改良 UK
- 中性子束計測 UK
- 증기발생기에서의 초음파 누설검지기...UK
- NSSS 제어방식 UK
- 나트륨 누설 검출 UK, ENEA
- 振動測定器 ENEA
- 超音波 Loose Parts Monitor ENEA
- VOLGA 파손핵연료 검출장비 CEA
- 大型機器의 淨化와 汚染除去 ENEA
- 핵분열생성물거동 UK

高速爐 爐物理와 爐心核設計

1960年代부터 各國이 모자라는 폴루토늄을 서로 빌려 쓰면서 展開된 이 分野의 共同研究는 核資料生産과 群定數整備, 原子爐核計算과 Benchmark積分實驗을 통한 評價事業으로부터 核燃料再配置時의 臨界面計算과 核計算體制의 評價를 위한 SNEAK에서의 實驗으로까지 이어져왔다. 이와 같은 協力は 實驗分野에서만 이루어지고 原子爐核計算은 獨自的으로 遂行되어 왔다. 그러나 앞으로의 開發努力을 共同의 目標로 結案시키기 위하여는 무엇보다 먼저 이룩하여야 할 일은 共通의 核資料, 群定數, 核計算體制의 整備이다.

그의 첫단계 사업으로 유럽공동 핵자료화일(JEF)를 1988년까지 마련하고 이것을 기초로 爐心核計算用 컴퓨터코드와 코드시스템의 統一에 힘쓰기로 하였다.

이 分野에서의 協力, 특히 臨界面, 制御棒反度價, 爐週期間反應度損失, 出力Form-factor 등 主要 爐物理 파라미터 計算體制의 整備로 제어봉수의 감소, 연소기간의 精確한 예측을 통하여

발전단가의 低減으로 이어지게 된다.

또한 SPX-1 起動爐物理實驗에 DeBeNe, E-NEA, UK 전문가를 참여시켜 核計算體制와 測定値의 比較도 행하도록 하고 있다.

安 全 性

지난 10餘年間 各種 理論研究와 實驗의 研究가 假想爐心崩壞事故現象을 究明하므로써 이 現象을 設計基準事故로 取扱하는 나라는 유럽에 는 없어지게 되었다.

따라서 安全性研究의 方向은 假想爐心崩壞事故發生後 被害防止對策이 아닌 假想爐心崩壞事故로 發展될 危險性이 있을 것으로 추측되는 初期異常現象의 發生을 防止하는 方向으로 모아지게 되었다.

高速爐 固有의 特性을 살린 自然對流에 의한 분리열 냉각능력의 향상을 위한 연구, passive한 緊急爐停止系統의 積極的인 導入으로 改善된 高速爐의 安全性研究는

- 定常과 非定常時의 플랜트 動的의 舉動의 SIM-MER와 SAS3D코드를 활용한 연구
- Phenix와 SPX-1에 의한 事故後 自然對流에 의한 崩壞熱 除去能力研究
- 集合體內 冷却材流路閉鎖와 Pin-to-Pin 破損傳播機構의 究明 등을 통한 集合體 事故研究
- 나트륨 에어로솔과 壓力發生을 隨伴하는 Pool火災, Spray火災, 이들의 結合으로 이루어지는 나트륨火災를 究明하기 위한 ES-MERALDA와 FAUNA시설을 이용한 CEA, ENEA, KfK, 共同研究

이 밖에 CABRI과도실험에서의 KfK, CEA, UK-AEA 共同研究도 重要한 意義를 갖는다.

爐心熱水力 및 爐內機器

이 分野는 핵연료, 블랑퀴, 제어봉집합체에서의 나트륨 냉각재의 熱 流動研究를 擔當하여 가

장 重要한 項目은 自然對流에 의한 崩壞熱除去가 되겠다. 특히 爐心變型時의 冷却流路 變化研究가 中心이 된다.

主要共同研究 項目을 例示하면

- 地震時 爐心の 機械的 變型舉動

CEA, ENEA, UKAEA, BN

○核燃料交替期間中 爐心과 핵연료교환기에 작용하는 力學計算 - UKAEA, CEA 등 10個 項目이다.

原子爐容器, 核燃料取扱 및 附屬機器

다른 分野와는 달리 이 分野는 特定原子爐 固有의 問題가 主된 項目이 될 것이기 때문에 共通課題는 다음과 같이 極히 制限된 것이 되었다.

- 大口徑 나트륨配管에서의 層流現象
- 나트륨 에어로솔에 관련된 기초연구
- 輻射熱放出係數 測定
- 나트륨의 動的 마찰계수와 密封研究
- Rapsodie에서의 나트륨 누설 위치 검지
- 熱스트립핑研究

蒸氣發生器, 펌프, 中間熱交換器와 밸브

프랑스 CEA는 共同研究에 參與하는 機關들에게 SPX-2用 研究項目을 제시하므로써 참가를 요청하였다.

英國이 參與를 要請한 項目은 다음과 같다.

- 中間熱交換器 Edge effect
- 代替 蒸氣發生器 設計(直管型)
- 나트륨-물 反應에서의 누설전과, 풀 화재, 미세누설, 누설전과포형, 超音波 檢知技術

DeBeNe가 요청한 分野는

- 펌프 空洞化(캐비테이션)
- 配管支持
- 나트륨-물 反應에서의 누설전과와 유로의 關聯을 究明하는 理論計算, Rupture Disk의 性能檢査, 水素檢出

- 나트륨밸브의 外部火災
- 버터플라이 밸브의 適用性評價
- 나트륨 누설 검지 기술
- 熱·水力計算
- 回轉子 動力學
- Nerson 超音波게이징
- DNB

또한 SNR-2設計에 대한 유사한 研究項目들이 評價分析되고 있다. 그간의 注目할만한 實績으로는

- 열·수력 계산 코드의 교환이용
- Hangel 50MW 증기발생기를 이용한 DNB/dry out 實驗
- SPX용 Nerson 超音波게이징시스템 性能檢査
- 펌프 空洞化 究明을 통한 펌프物理의 理解로 보다 性能좋은 펌프의 開發

등을 들 수 있다. 英國에서도 증기·나트륨表面反應(Pool 火災)研究를 위한 實驗을 完結한바 있다.

原子爐運轉

그간 Rapsodie, Phenix, DFR, PFR, KNK-II 등 原子爐運轉에 關한 經驗의 交換은 활발히 수행되어져 왔다. 또한 이들 原子爐를 이용한 각종 플랜트특성 파라미터測定實驗이 共同研究를 通하여 推進되어 왔다.

특히 1983년 Rapsodie의 廢爐에 앞서 行하여진 動的試驗은 매우 뜻깊은 理解를 그들에게 마련하여 주었다. 原子爐를 停止시키지 않은 狀態에서 1~2次 冷却系統 全部를 電源遮斷을 行함으로써 冷却材 流量損失實驗을 원자로서 行하여 온 것이다. 結果는 計算이 밝히고 있던 바와 같이 負의 도플러效果에 의하여 10分 以內에 原子爐出力을 이까지 低下되었다. 그간에 겪은 Hot channel에서의 最高溫度는 700℃로서 880℃의 비등점까지는 相當한 餘裕가 있음이 밝혀졌다.

DYANA코드의 檢證實驗도 行하여져 좋은 一致熱보였다.

構造材

高温冷却材, 放射線, 高負荷, 熱衝電, 스트링핑 효과 등에 오랜동안 견디어내야 하는 構造材의 開發은 原子爐壽命의 延長을 通하여 經濟性向上에 크게 寄與하게 된다.

SNR-2와 SPX-2를 위한 조절된 研究항목은

- 安全性과 플랜트信賴度를 決定짓는 爐材料 仕様(Material Specification)의 共通作成
- 類似한 運轉條件과 安全性基準
- 爐材料 認識에의 一致努力

예로서는 SNR-2 原子爐 容器는 SPX-1의 316-L의 Material Spec.을 適用하는 것들이다. 英國 또한 CDFR에 316-L를 사용토록 계획하고 있다.

그러나 원자로 덮개와 증기발생기재료에서 一致點을 못찾고 있다.

그들이 밝혀야 된다고 생각하고 있는 主된 素材의 研究項目을 列擧하면 다음과 같다.

- 非彈性解析에 있어서의 재료자료
- 용접부위의 creep 특성
- creep 피로 相互作用
- 熱스트링핑 / 高週期疲勞
- 非交替 構造材의 照射特性
- 機械的 特性에 미치는 나트륨效果
- 延性強度
- 遷移部位 接續
- 증기발생기에서의 耐부식성재질
- 용접 容易性的의 究明

이 밖에 流體-構造材 相互作用分析, 熱負荷에 의한 Backling, Ratcheting研究 등이 追加되고 있다.

이 다음 호에서는 이들 공동연구가 수행될 수 있도록 한 각종 협정, 이들이 개발코자 하는 실증로의 특성과 건설체제 등을 SPX-1과 비교 살펴 보도록 하겠다.