

原子力用 로봇의 開發狀況

原子力發電플랜트의 點檢·檢査·保守·補修 등 메이테넌스 作業分野에서는 機器의 신뢰성 향상, 정기검사시간의 단축, 작업종사자의 피폭선량저감 등을 위하여 遠隔自動裝置(原子力用로봇)의 도입이 도모되어 왔다. 다음은 加壓輕水爐型 原子力發電所(PWR)를 위한 原子力用로봇의 開發·適用狀況에 관한 概要 紹介이다.

加壓輕水爐型原子力發電所

1. 原子力用로봇의 開發動向

初期의 플랜트에서는 연료나 방사성폐기물의 취급 등 일부를 제외하고는 거의 대부분의 보수작업이 크레인 등 揚重設備과 手工具를 사용해서 실시되어 왔다. 그러나 原子力發電이 電源供給에서 占하는 비중이 커짐에 따라 거기에 相應하는 稼動率, 經濟性 등이 요구되어 방사선 환경하에서 보수작업의 工期·工程數의 低減과 作業의 質的 向上이 중요과제가 되었다. 放射線源의 저감과 보수작업의 工法改善 등 각종 對應策의 일환으로 보수작업의 遠隔操作化에 대한 요구가 강해져서 早期에 개발되는 것부터 具體化가 도모되었다. 현재까지 自動工具的인 것을 포함해서 수십종의 보수용 원격자동 장치가 PWR용으로 개발되어 적용되어 왔다. 이들의 대부분은 特定作業을 대상으로한 專用裝置인데 기대에 부응하여 큰 효과를 발휘하고 있다.

原子力發電所內에는 원격자동화가 요망되고 있는 많은 작업이 아직도 사람손에 의해 행해지고 있으므로 豫防保全對策 등에서 새로운 작업이 추가될 것으로 예상된다. 이와 같이 로봇화의 범위가 확대됨에 따라 專用裝置나 그 制御盤에 의해서 既存의 發電所內에서는 過密

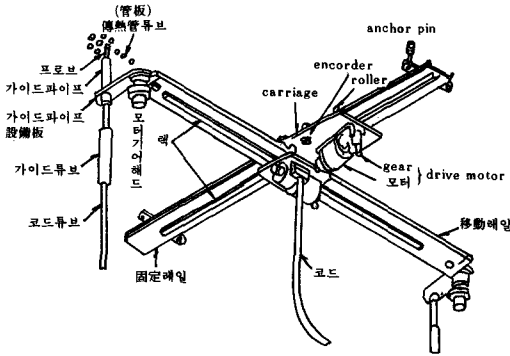
하게 되어 로봇의 운전보수문제와 다른 작업과의 干涉 등이 현저해질 것으로 생각된다. 보수작업의 많은 부분은 각 작업내용 고유의 프로세스와 공통되는 프로세스를 포함하고 있으므로 원래의 최소한의 전용장치와 이것을 둘러싼 高機能汎用裝置를 組合시키고 또 로봇운전의 負擔輕減을 위해 自律型 시스템으로 기계화를 추진해 나가는 것이 바람직하다. 高機能汎用化와 自律化에는 고도의 기술개발이 요구되므로 장기적인 對應을 도모하고 있으나, 당면하고 있는 강한 로봇화 要求를 충족시키기 위해서도 가능한 한 理想的인 대책을 추구하여야 할 것이다.

2. 로봇의 實用化 및 開發事例

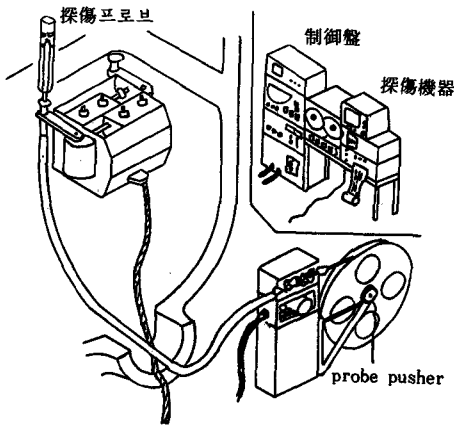
(1) 蒸氣發生器의 保守用 遠隔自動裝置

증기발생기 전열관의 健全性은 渦電流探傷檢査(ECT)에 의해 定期검사때마다 확인하며 필요에 따라 豫防保全對策 등이 실시된다. 증기발생기 1基當 약3,300개가 있는 傳熱管으로의 접근은 蒸氣發生器下部의 水室맨홀을 통해서 이루어지는데, 水室內은 내벽에 부착되어 있는 방사성부식생성물에 의해 방사선레벨이 높으므로

〈그림 1〉 蒸氣發生器傳熱管檢査用 案内裝置



〈그림 2〉 蒸氣發生器 ECT로봇



보수작업 종사자의出入은 하루에 2~3분으로 제한된다.

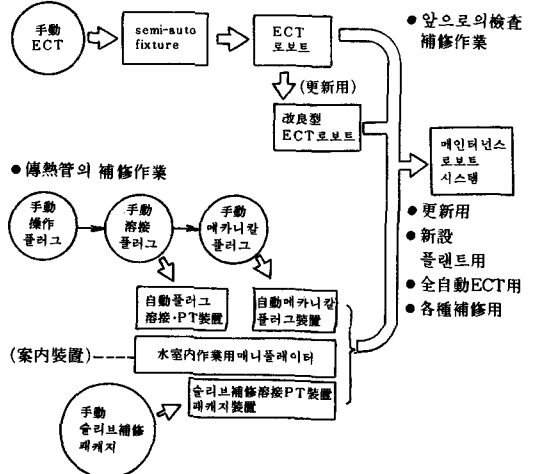
1) ECT로봇: 최초의 ECT는 사람이 水室内에 들어가 ECT프로브를 傳熱管에 手動插入해서 행해졌다. 1972년에는 遠隔位置決定을 할 수 있는 固定式 案内裝置와 프로브의 挿入引出 驅動裝置가 개발되어 적용되었다. (그림 1). 固定式에서는 傳熱管 전부를 검사하기 위해 사람이 水室内에 들어가서 고정위치를 여러번 변경할 필요가 있으므로 全自動步行型 ECT로봇이 1975년에 試驗完了되어 그후 일본에서는 국내의 모든 PWR에 적용되었다(그림 2).

ECT로봇은 다음과 같은 구성을 가지고 있다.

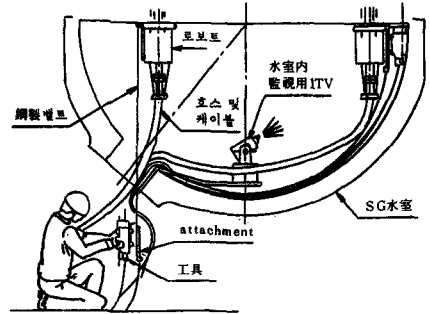
① ECT프로브 및 신호처리장치로 이루어진 渦電流探傷系機器.

〈그림 3〉 蒸氣發生器用 로봇의 主要變遷

● 過電流探傷檢査(ECT)作業



〈그림 4〉 蒸氣發生器 메인テナンス 리퍼비(SG-MR)



② 프로브를 傳熱管에 挿入引出 驅動하는 挿入裝置.

③ 프로브를 所定の 傳熱管에 안내하는 캐리어.

캐리어는 4개의 발을 管板의 管孔에 삽입하여 발끝을 부풀게 해서 마찰력에 의해 管板에 매달리게 하고 2개씩 발을 離脫시켜 近接管孔에 삽입고정 시키는 것을 교대로 조작하여서 管板上面을 전후 좌우로 步行한다. 手動ECT에서 고정식 안내장치를 거쳐 全自動步行型 ECT로봇으로 이르는 개량에 의해 ECT작업에 관계하는 종사자피폭은 100%에서 5%로, 다시 1%로 低減되었으며 所要日數도 1/4정도로 단축되었다.

2) 水室内作業用 매니플레이터(SG-M) 시스템

: ECT의 결과를 기초로 傳熱管에 플러그 시공이나 예방보전대책을 실시하는 水室内作業용 매니플레이터와 이것을 搭載하는 自動工具가 개발되어 實機適用에 들어갔다. 이 장치는 水室 밖에서의 취급으로 水室内에 설치된 3次元極座標 매니플레이터의 先端에 各種 作業用自動工具를 부착시켜 遠隔으로 傳熱管에 접근·위치결정과 自動工具를 조작한다.

自動工具에는 機械加工, 클리닝, 液體浸透探傷, 육안검사 등 各種의 것이 준비되어 있으며 必要한 工具를 水室맨홀入口에서 교환하면서 일련의 작업이 실시된다. 主된 작업으로는 傳熱管에 플러그施工, 傳熱管의 슬리브보수 등 검사를 포함해서 遠隔으로 행할 수가 있다. 이 장치의 효과는 작업내용과 작업량에 따라서 다르나 手作業에 비해 방사선피폭은 1/3~1/5정도가 된다.

3) 各種遠隔自動裝置: ECT로봇 및 水室内作業용 매니플레이터 시스템의 변천과 앞으로의 개량 및 更新 등을 결부시키면 그림 3과 같이 검사와 보수를 통합하여 보다 간소화된 매니플레이터 로봇 시스템을 고안할 수 있다.

증기발생기에 적용된 기타 원격자동장치의 예로는 ① 사람이 水室内에서 장시간 보수를 해야 할 경우, 水室内에 부착된 방사성원소를 씻어내는 水室内自動除染裝置, ② 맨홀 뚜껑 취급장치, ③ ECT로봇을 개량 발전시켜 輕量·小型化하여 벨트昇降式 工具交換機構를 가지고 있는 증기발생기 메인テナンス 로봇(SG-MR)(그림 4) 등을 대표적인 것으로 들 수가 있다. SG-MR과 SG-M은 그림 4의 메인テナンス 로봇 시스템의 中心的로봇로서 각각 短期, 長期의 보수작업으로 구분되어 사용된다.

4) 開發中の事例: ① 앞에서의 水室内自動除染裝置에 비해 除染性能의 向上, 除染廢液發生量의 低減, 除染作業時의 피폭저감을 도모하기 위해 日本에서 개량·제작과 實證試驗을 추진하

고 있는 蒸氣發生器水室内 自動除染裝置, ② 원자로 캐비티에 물을 채워서 행하는 原子爐側 作業과 병행하여 蒸氣發生器水室内 作業을 할 수 있게 하기 위해 증기발생기노즐부를 밀봉하는 노즐뚜껑을 水室밖에서 看脫할 수 있도록 개발 중인 遠隔着脫裝置 등이 있다. 水室内作業에 개별적으로 개발되어온 各種 로봇을 소정위치에 자동으로 안내하는 시스템化 開發이 앞으로 기대되고 있다.

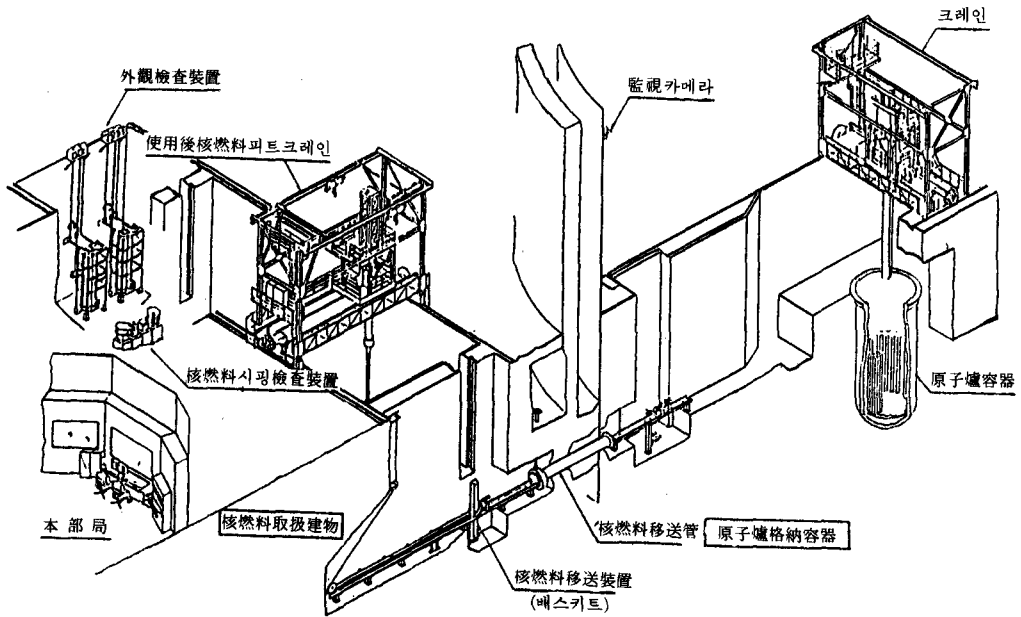
(2) 原子爐 및 核燃料의 保守用 遠隔自動裝置

원자로용기뚜껑의 開閉, 핵연료의 교환과 검사, 爐內構造物의 보수 등은 定期檢査 때마다 또 원자로용기의 용접부 검사는 정기적으로 행해진다. 이들 작업의 많은 부분이 정기검사의 クリティ칼 패스에 있으며 뚜껑의 開閉 이외에는 방사능레벨이 높은 機器가 대상이므로 遠隔水中作業이다.

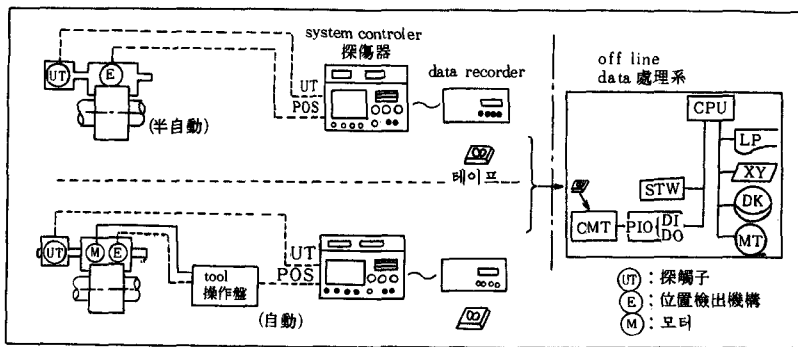
1) 原子爐容器뚜껑 開閉裝置: 원자로용기뚜껑의 개폐·복구작업은 뚜껑에 부착되는 설비와 플랜지 볼트의 취급으로 大別된다. 前者는 패케지화한 뚜껑一體化構造物의 개발에 의해 취급작업의 간소화가 도모되었다. 종래의 나사식에 비해 최근 적용을 시작한 킥 커플링식 텐션에서는 볼트의 頂部를 잡는 기구를 手動나사式에서 環狀淸에 의한 순간착탈식으로, 나사의 회전을 수동에서 자동으로 각각 개량하여 작업의 원격화와 시간단축이 도모되었다.

2) 自動核燃料交換크레인: 爐心에서 핵연료를 꺼내고 裝填하는 작업에 사용되는 핵연료교환크레인은 가동중인 PWR에서는 手動運轉方式이다. 핵연료취급작업은 핵연료보호상 그 신뢰성이 가장 중요시되므로 操作員의 부담경감 및 일정한 조작을 위해 운전조작의 자동화를 도모하고 있으며, 또한 水中에서의 핵연료취급 상황을 항상 감시할 수 있는 水中監視 TV裝置를 설치한 자동핵연료교환크레인을 개발 완성하고 있다. 이것은 자동위치결정 호이스트 속도자동관

〈그림 5〉 全自動核燃料取扱検査システム



〈그림 6〉 全自動·半自動 配管超音波探傷裝置



리, 荷重監視 등 여러가지의 개량이 도모되고 있으며 일본에서는 현재 건설중인 플랜트 부터 적용되고 있다.

3) 原子爐容器超音波探傷裝置 (UT Machine) : 원자로용기의 건전성을 확인하기 위해 용접부의 검사를 정기적으로 容器内面에서 水中으로 초음파탐상법에 의해 행하는 UT Machine이 개발되어 1980년부터 實機ISI로의 적용이 시작되고 있다. 胴용접부탐상용과 노즐 등 특수형 상부탐상용 두종류의 9方向 同時探傷探融子板을 입의의 위치에 안내하는 多關節 매니플레이터 및 昇降·旋回裝置, 제어 및 探傷데이터 處理裝置를 搭載한 大型트레일러 등으로 구성된다. 그리

고 이 장치의 前身인 稼動前検査 (Pre-Service Inspection, PSI)用 UT Machine은 1972년에 개발되어 원자로용기의 공장검사에 적용되어 왔다.

4) 기타의 遠隔自動裝置 : 그밖의 適用例로는 ① 制御棒案内管을 上部爐心 構造物에 결합하는 支持핀의 건전성을 裝着된 상태에서 확인하는 支持핀用 원격조작초음파 탐상장치, ② 핵연료 집합체의 누설과 외관 검사, 핵연료시핑검사장치 및 水中TV에 의한 외관검사장치, ③ 핵연료 집합체의 건전성 향상을 도모하기 위한 주변 물의 흐름방향을 변경하는 爐内構造物 업플로우화裝置, ④ 사용한 burnable poison의 減容化裝置 등이 대표적인 것이다.

5) 開發中の事例: ① 원자로용기 뚜껑개폐작업중 機械化가 남아 있다면 개발중인 스테르텐 선자동위치결정안내장치, 스테르볼트 청소·검사장치, 原子爐容器 플랜지面 水中自走式 청소장치, ② 자동화개발이 끝난 핵연료교환크레인, 핵연료 이송장치, 사용후핵연료 피트크레인, 핵연료검사장치와 함께 일련의 시스템으로 구성하여 원자로격납용기 내외에 걸쳐 全自動화를 추진하는 전자동핵연료취급·검사 시스템(그림 5) 등이 있다.

(3) 其他 機器設備의 保守用 遠隔自動裝置

1) 配管自動超音波探傷裝置: 배관 ISI時的 피폭은 정기검사작업시 총 피폭의 수%를 占하므로 ISI작업의 원격자동화를 도모하여 1980년에 일반배관 및 原子探傷裝置가 개발되었다(그림 6). 배관의면에서 수직 및 斜角探傷을 적용하여 磁氣테이프를 사용한 探傷데이터集録시스템을 가지며, 손으로 探傷하는 것에 비해피폭저감이 1/2정도가 기대된다.

2) 放射性固體廢棄物시스템: 발전소에서 발생하는 방사성폐기물은 다종다양한 형태를 갖고 있으며 각각의 상황에 알맞는 처리·저장에 관한 기술개발을 하고 있다.

고체폐기물은 원칙적으로 드럼에 넣어서 플랜트施設內에 格納保管되고 있으나, 이와 같은 보관설비에서의 작업을 合理化시켜 작업중사자의 피폭선량을 적게 하기 위해 개발·적용된 自

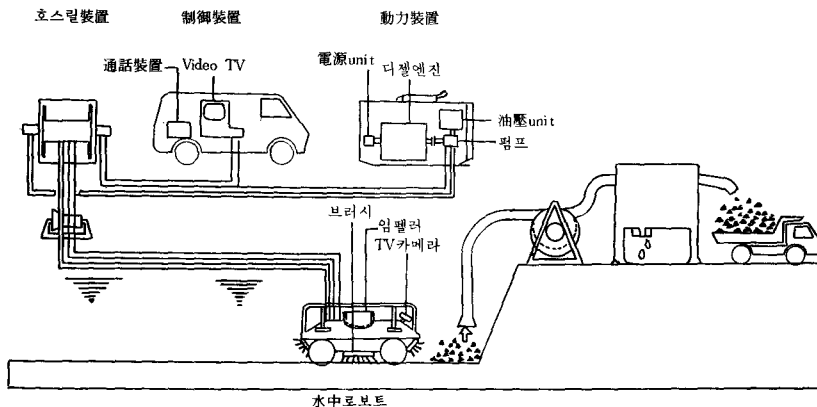
動收納·保管裝置도 로봇化의 한가지 예이다. 이 시스템의 특징은 지금까지 사람손에 의지했던 저장고 내의 하역작업을 완전히 無人化함으로써 작업자의 피폭저감을 도모한 것이며 또 各機器의 精度를 올림으로서 완전하고 확실한 荷役作業을 하며, 저장고내에서는 격납효율이 좋은 시스템으로 한 것이다.

3) 取放水路清掃用 水中로봇(그림 7): 火力 및 원자력 발전소에서는 冷却用 海水의 取放水系統이나 復水器 등 해수냉각 열교환기의 건전성유지를 위해 外來의 異物이나 海洋生物의 침입·부착생육의 방지 및 제거처리가 운영관리상 중요한 과제의 하나가 되고 있다. 해양생물의 부착 생육방지에 관해서는 종래에는 定期檢査 등에서 水路의 물빼기 또는 잠수작업에 의해 人力으로 除去하여 搬出한후 폐기처리하고 있었으나, 작업환경이나 안전성, 폐기처리의 곤란성, 所要工期 및 코스트 등의 문제가 있어 제거처리방법의 개선이 크게 요망되었다.

일본에서는 1981, 1982년도에 電力會社가 공동으로 콘크리트水路의 벽면, 天井에 부착생육한 해양생물을 원격조종으로 제거하는 水中로봇을 개발했다. 이 로봇은 ① impeller, brush, TV camera, senser를 가진 水中로봇, ② 디젤엔진과 油壓펌프로 구성된 動力裝置, ③ 호스릴장치, ④ 제어장치로 이루어진다.

섬유강화 플라스틱(FRP)으로 만들어진 水中

〔그림 7〕 取放水路清掃用 水中로봇



로봇은 세로 1,780mm×가로 1,270mm×높이 880mm, 地上重量 520kg이나 海水中에서의 중량은 제로이다.

Impeller와 brush를 회전시켜 impeller에서 排出하는 제트水流에 의한 反力에 의해서 水路의 上下左右 壁면에 吸着해서 부착·생육한 각종 해양생물을 水路稼動狀態에서도 제거할 수 있다. 走行에는 4개의 독립된 驅動車輪도 사용된다.

4) 其他: ① 펌프吸込側配管 엘보内に 필요없게 된 整流板을 플라즈마 아크에 의해 절단제거하는 배관내 절단장치, ② 사용후핵연료 랙의 개조를 위해 그라파이트 아크에 의해 鋼材를 절단하는 핵연료 핵수중절단장치, ③ 용접부의 加壓器用電熱히터를 遠隔交替가 가능하게 하는 加壓器히터交替裝置, ④ 爐內計裝可動式 中性子檢出器의 案内管의 내부를 遠隔청소하는 장치 등이 있다.

③은 앞으로 필요할 경우에 사용될 예정이나 ①~③은 모두 일상적이 아닌 특수한 작업을 위해 개발된 것이다.

5) 開發中の 事例: ① 配管自動超音波探傷裝置의 適用率 向上을 도모하기 위한 曲管部자동 초음파탐상장치, ② 방사선구역 機器設備의 점검을 가능케 하는 자동점검장치, ③ 電力會社와의 공동연구로 개발중인 배관내부 점검장치 등이 일본에서 개발중이다.

3. 高機能汎用로봇의 開發

蒸氣發生器 水室內 매니플레이터(SG-M)나, 同 메인テナンス 로봇(SG-MR)는 傳熱管의 보수작업이라는 한정된 범위에서 汎用裝置라고 할 수 있으나, 넓은 의미에서는 전용장치로 간주된다. PWR발전소의 작업중 로봇 要求의 과반수는 전용장치의 개발·도입에 의해 充足할 수 있다고 생각되나, 高機能汎用裝置를 채택하는 것이 보다 로봇화하기 쉬운 작업도 있다.

1) 밸브關聯作業의 로봇化: 1 차계통 밸브

류의 보수작업은 발전소당 수천개 있는 중에서 週期的으로 보수를 할 수 있도록 年間 수백개를 선정하여 주로 定期檢査時에 실시된다. 1개의 보수작업에서는 평균 피폭량이 적으나, 전체 합계는 발전소내 작업피폭량의 上位를 占하는 경우도 있다. 밸브류는 발전소내에 분산배치되어 크기, 구조, 종류, 수량이 다양하고 배치와 설치환경이 다르며 작업내용도 分解·點檢, 部品交換, 手入, 組立 등 여러가지 인데다가 또한 한정된 期間內에 실시할 필요가 있다.

이와 같은 밸브류 보수작업을 기계화함으로써 보다 더 效果를 높이려면 發電所內를 이동하면서 사람의 능력에 가깝고 신뢰성이 높은 半自律 또는 自律型 多機能汎用裝置의 併用이 바람직하다. 일부작업에 대한 기계화의 시도가 시작되고 있으므로 이와 같이 밸브 고유작업의 自動工具化를 추진함과 함께 최근의 기술개발동향으로 보아 언젠가는 실현될 自律型汎用로봇의 개발에도 적극적으로 대처해 나갈 것이 기대된다.

2) 輕作業用 모빌 매니플레이터: 일본의 경우 通産省 施策으로 1980년부터 5개년 계획으로 개발중인 「格納容器內 自動點檢시스템」은 통상 운전중에 사람의 접근이 곤란한 機器 등의 상세점검정보를 제공하여 異常事象의 早期發見과 早期對應에 의해 플랜트의 가동율 향상을 목표로 하고 있다. 輕作業用 모빌 매니플레이터는 이 시스템의 일환으로서 시료의 채취, 手動밸브조작 등 輕作業을 분담한다.

4. 앞으로의 課題

PWR발전소에서는 현재 기계화의 要求가 큰 補修作業부터 비교적 쉽게 적용 가능한 로봇 기술을 기반으로 遠隔 自動화를 도모하고 있다고 할 수 있다. 이와 같은 경향은 여러 운용 과제를 해결하면서 점점 PWR플랜트 보수작업의 질적 개선에 기여할 것으로 기대된다.