

SMR의 모듈 적용 사례 및 개발 방향성

'24년 추계 원자력학회 워크숍: 수냉각형 SMR 시장다변화 전략과 개발 방향

현대엔지니어링 / 원자력사업실

이상일 실장 (sang@hec.co.kr)

2024. 10. 23



목 차

1 정의 및 형태

2 필요성

3 적용 사례

4 개발 방향성

정의 및 형태

1 정의

❖ 모듈화

- 건설 시간을 단축하고 건설 비용을 절감하기 위해 현장 작업을 현장 외부의 공장에서 제작할 수 있는 모듈로 구성하는 설계 프로세스
- 아래 그림과 같이 건설 위치별로 크게 3가지 형태로 구분

❖ 1-3-8 법칙

Construction Location	Off-Site Factory (or supplier)	On-Site Shop	In-situ
Final Product	Modules, Components, Equipment 	Super-modules 	Final NPP 
Productivity (Relative Time)	High (1 hour)	Moderate (3 hours)	Low (8 hours)
Transport Options	Road and/or rail Maybe barge, air	Derrick crane Barge	N/A
Manufacturing Capabilities	Many	Limited	N/A

정의 및 형태

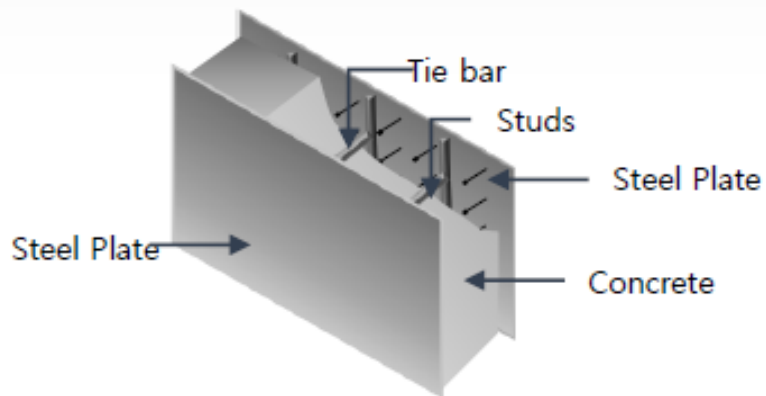
2 형태

1) 구조 모듈

- Semi-Modular Reinforced Concrete
- Solid Reinforced Concrete



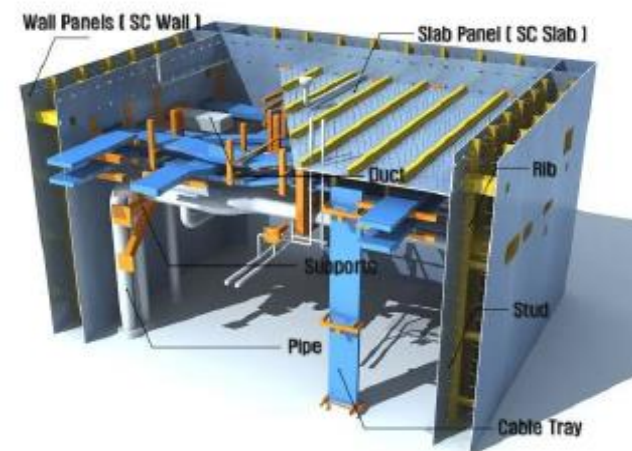
- Steel-Plate Concrete



2) 기기 모듈



3) 복합 모듈



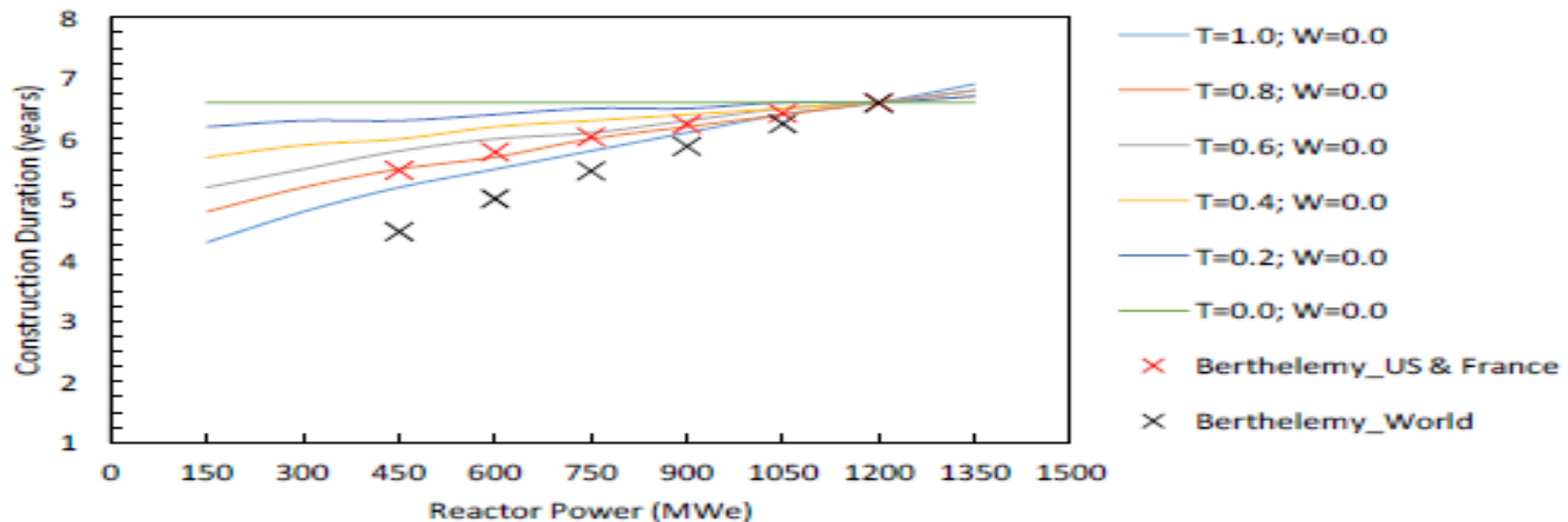
1 SMR 사업화의 어려움

❖ 높은 건설비 : 대형 원자력 발전소 대비로도 2.5배 높은 것으로 추정

	Natural Gas		Coal		Nuclear
	LCOE	LCOE with Carbon Cost ^a	LCOE	LCOE with Carbon Cost	LWR
US	0.67	0.85	0.88	1.21	1.0
South Korea	1.54-2.69	1.78-2.93	1.40	1.99	1.0
Japan	0.92-1.46	1.05-1.58	0.94	1.23	1.0
China	0.74-1.72	0.97-1.95	1.03	1.63	1.0
France	0.58-1.05	0.71-1.18	-	-	1.0

^a Assumed carbon cost is \$30/tonne of CO₂

❖ 긴 건설 기간 : 시공기간만 4~7년 소요 (450MWe ~ 1200MWe)



2 건설비 절감 전략

❖ 표준화된 모듈화 적용을 통한 아래 도표의 비용 절감 전략 실행

Cost Reduction Strategy	Effect on SMR cost
Increased plant size	Constructing larger plants achieves greater economies of scale
Improved construction methods	One-off material and labour efficiency improvements; achievable through off-site manufacture
Reduced construction schedule	One-off productivity improvements; achievable through off-site manufacture
Design improvement	Simplified designs require fewer components, less building materials, and reduced labour
Improved procurement, organisation, & contractual aspects	Continuous learning benefits; achievable through supply chain organisation
Standardisation & series construction	Continuous learning benefits; achievable through off-site manufacture
Multiple unit construction	Continuous learning benefits; achievable through off-site manufacture
Regulation & policy measures	Government reduces uncertainty in regulation & energy market

<Cost reduction strategies and their effect on SMR construction cost>

3 목적

- 1) 건설 기간 단축
- 2) 건설비 감축¹⁾

Study/Author	Schedule Reduction	Cost Reduction	Project/Industry
Murtaza <i>et al.</i> [83]	25%	22%	General modularisation theory: cost and schedule savings depend on how easy it is to modularise the facility and on the level of support available for modularisation
General Dynamics Electric Boat [80] [51]	28%		Shipbuilding: naval
Garver & Abbott [69]	25%	10%	Shipbuilding: Blohm & Voss MEKO flexible warship
Modular Building Institute [84]	30%-50%		Civil: general observations Modularisation removes about 80% of work from site
Eftimie [85]	25%-50%		Oil & gas: onshore
Gotlieb <i>et al.</i> [86]	20% reduction in net critical path (40% reduction in man-hours)	13%	Chemical process: 300 MWe solid fuel plants (a pulverised coal-fired facility and a circulating fluidised-bed boiler plant) Productivity improved by 15%
Jameson [87]		18%	Chemical process: gasoil hydrotreater in the US Great Lakes
Shelley [78]	50%	20%	Chemical process
Hesler [88]	40%	20%	Power plants: general observations
Choi & Song [81]	22%		Piping/equipment package: construction of an underground machine room for a high-rise residential building

<Modularization across industries and its effect on reducing schedule and cost>

- 3) 학습 및 반복성
- 4) 시공성 향상
- 5) 건설 품질 향상
- 6) 노동 가용성 보장
- 7) 폐기물 감소
- 8) 자금 조달 용이

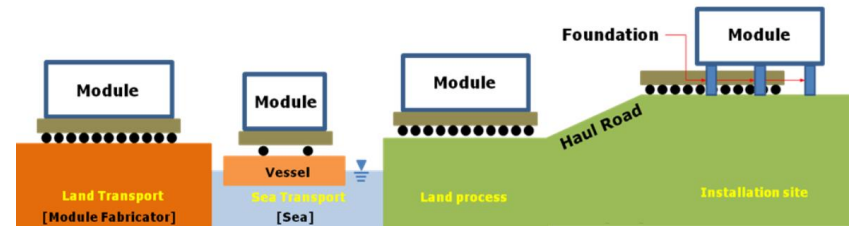
적용 사례

1 UAE SARB Pakcage-4 Project

수행사	현대엔지니어링
발주처	ADMA-OPCO
기간	2013.03 ~ 2018.12 (70 Months, RFSU / PAC)
모듈 제작 (Abu-Dhabi)	
해상 운송 (140 km)	
현장 설치 (Abu-Dhabi Zirku Island)	

❖ 설치 방법

- Method: **Direct Set Down Method**
- Equipment: **SPMT (Self-Propelled Modular Transporter)**

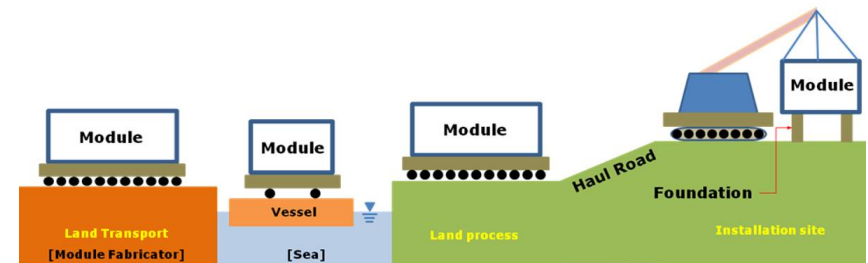


2 Venezuela Puerto La Cruz Project

수행사	현대엔지니어링	
발주처	PDVSA	
기간	2012.09~2019.12(88 Months, VDU MC)	
모듈 제작 (China 南通)		
해상 운송 (17,810 km)		
현장 설치 (Venezuela Puerto La Cruz)		

❖ 설치 방법

- Method: **Lifting Method**
- Equipment : **Onshore Crane**

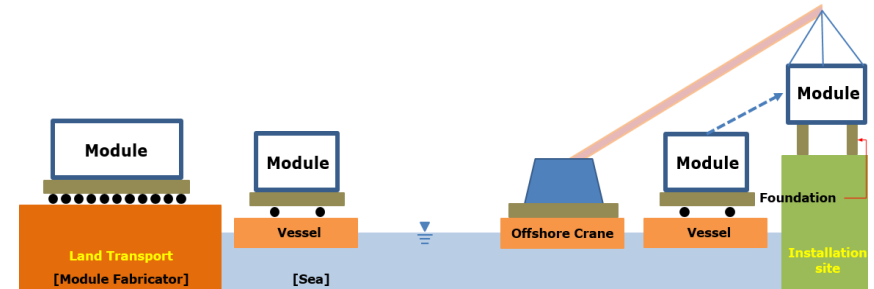


3 Kuwait Al-Zour LNG Import Project

수행사	현대엔지니어링	
발주처	Kuwait Integrated Petroleum Industries Company (KIPIC)	
기간	2016.05 ~ 2021.02 (57 Months, PAC)	
모듈 제작 (Onsite(Kuwait))		
해상 운송 (3.5km)		
현장 설치 (Onsite(Kuwait))		

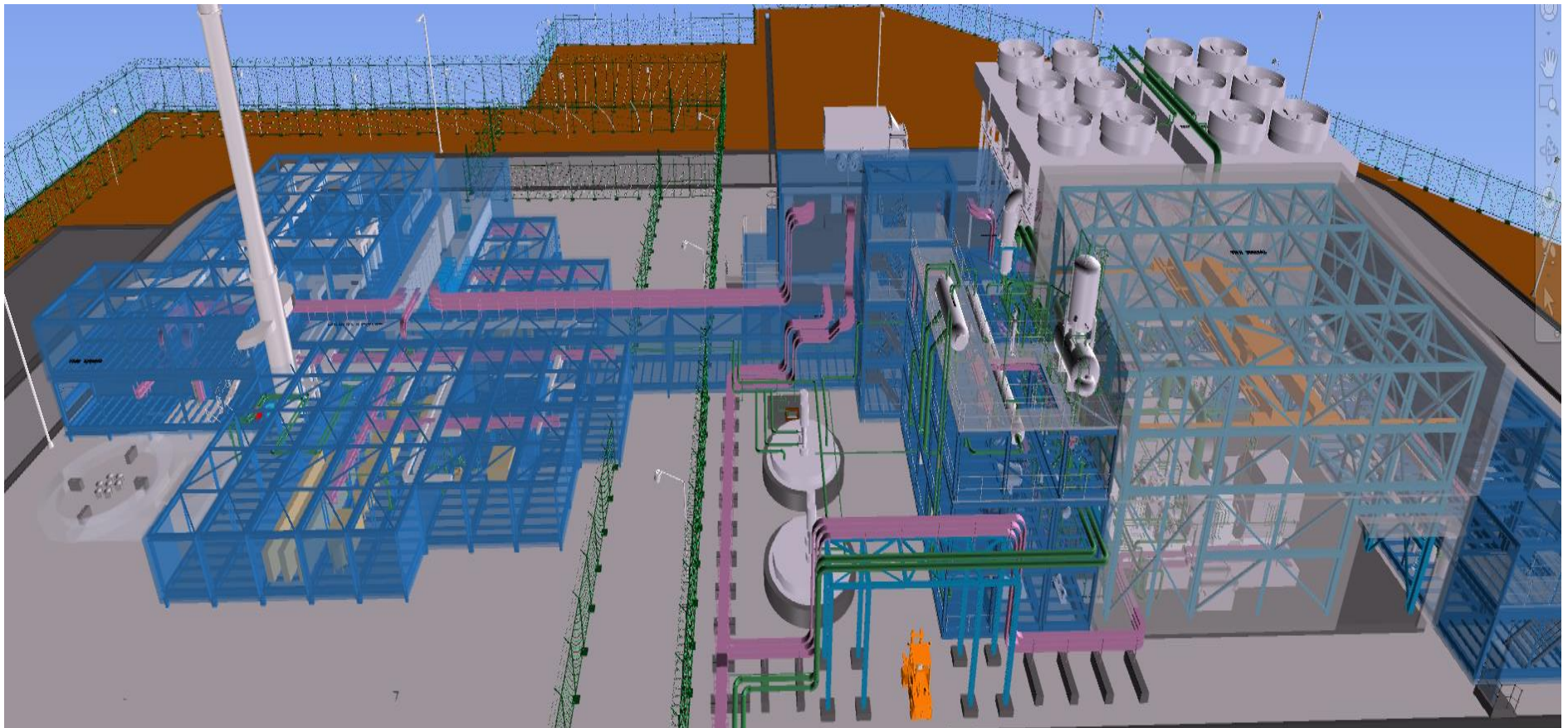
❖ 설치 방법

- Method: **Lifting Method**
- Equipment: **Offshore Crane**



4 Canada Micro-Modular Reactor Project

위치 / 수행사	Southeast area near Canada's Chalk River / 현대엔지니어링
용량	5 MWe
형태	High Temperature Helium Gas Reactor, 15 MWt



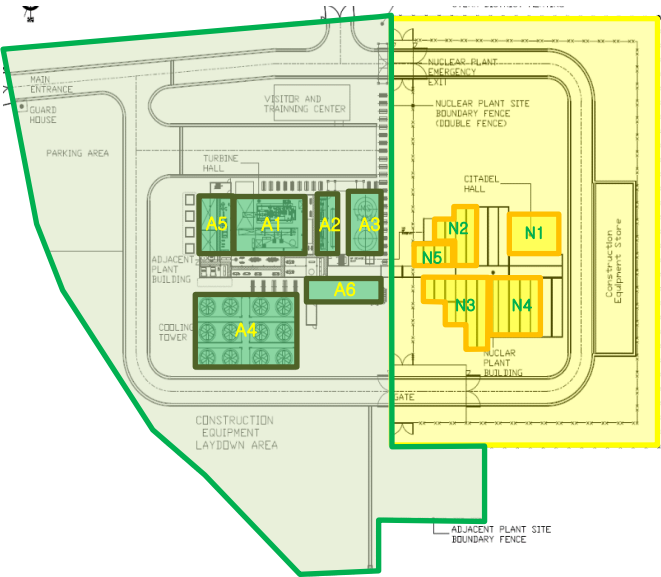
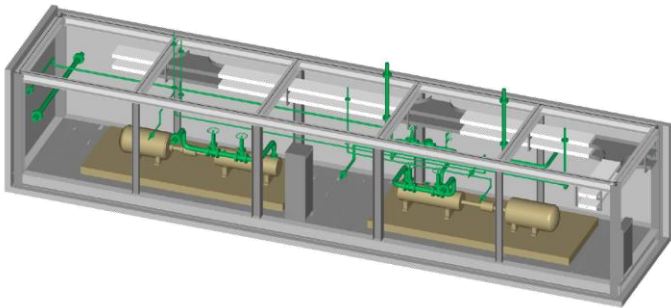
4 Canada Micro-Modular Reactor Project

❖ Nuclear Plant

- Citadel structure : Precast concrete
- Nuclear Building : Truckable Modules

❖ Adjacent Plant

- Steam Turbine Area, Cooling Tower Area : Stick-built
- Other Area : Truckable Modules



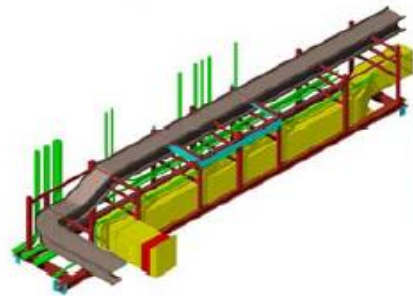
Unit Description	
Nuclear Plant (NP)	
N1	Citadel
N2	Waste Handling Area
N3	Control & Elec. Room
N4	HVAC Room
N5	Changing Room
Adjacent Plant (AP)	
A1	Turbine Hall
A2	Steam Generator
A3	Molten Salt Tanks
A4	Fin Fan Air Coolers
A5	WT and WWT Area
A6	Electrical Room

항목		수량
Citadel Structure	Precast Concrete	-
Nuclear Plant	20ft	9
	20ft Roof	9
	40ft	17
	40ft Roof	14
Adjacent Plant	6m	10
	6m Roof	4
	15m	70
	15m Roof	28
Total		161

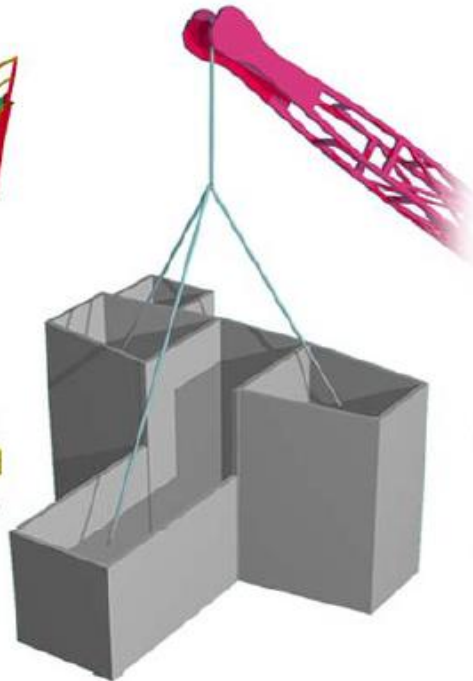
5 Westinghouse - AP1000

위치	China
용량	225 MWe
형태	Pressurized Light Water Reactor, 800 MWt

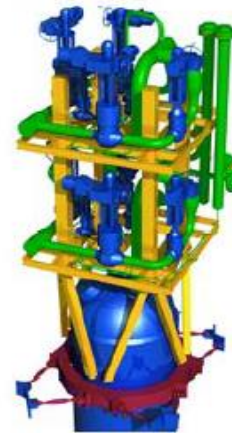
Pump/Valve Module



Raceway Module



Structural Module

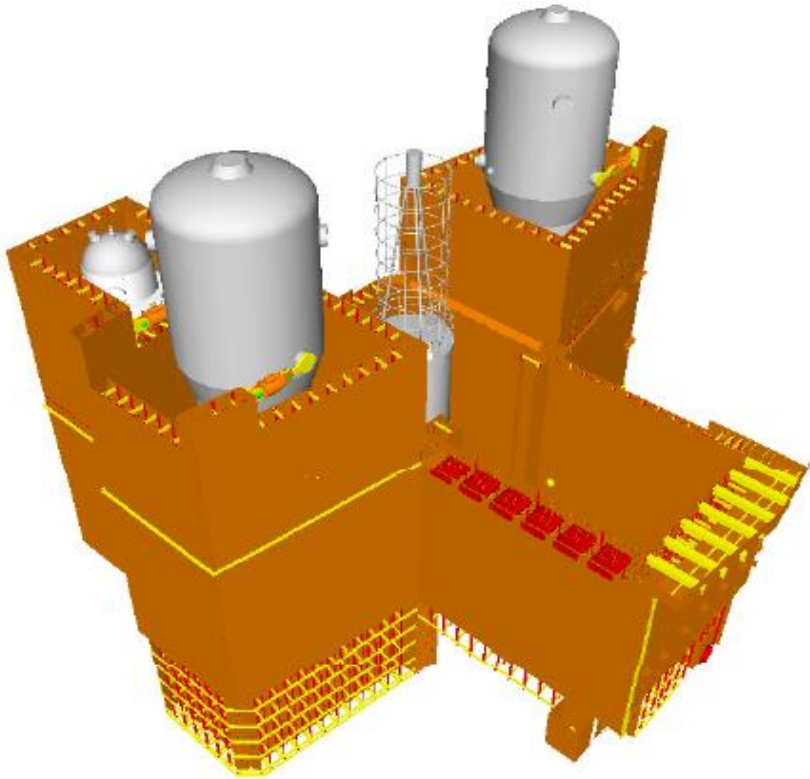


Depressurization Module

<u>Module Type</u>	<u>Number</u>
Structural	122
Piping	154
Mechanical Equipment	55
Electrical Equipment	11
TOTAL	342

5 Westinghouse - AP1000

❖ Inside Composite Wall 모듈 (Steam Generator & Refueling Canal)



5 Westinghouse - AP1000

❖ Building Composite 모듈 (Auxiliary Building)



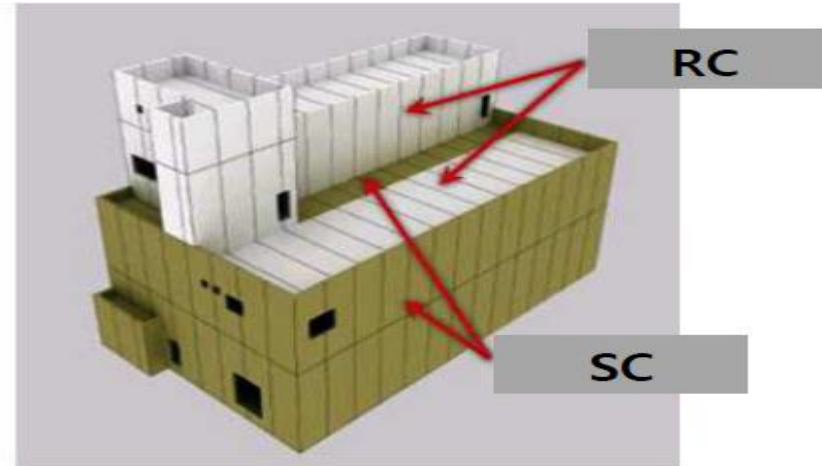
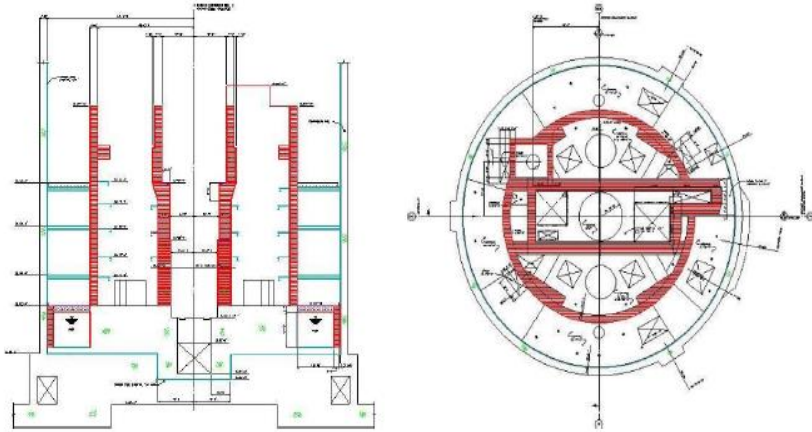
❖ 주요 Mechanical 모듈 (Middle and Upper Shroud)



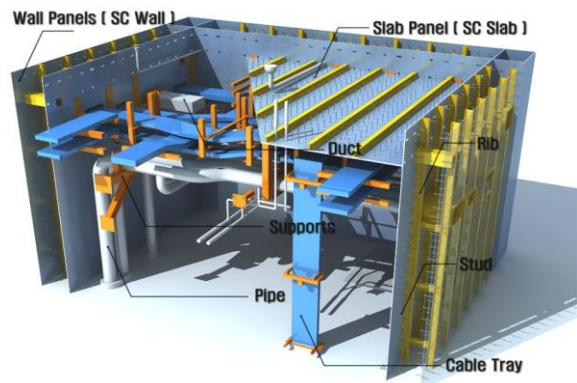
적용 사례

7 APR 1400

❖ 새울 1, 2호기 (Alternate AC Diesel Generator Building)



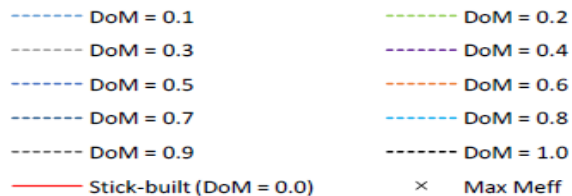
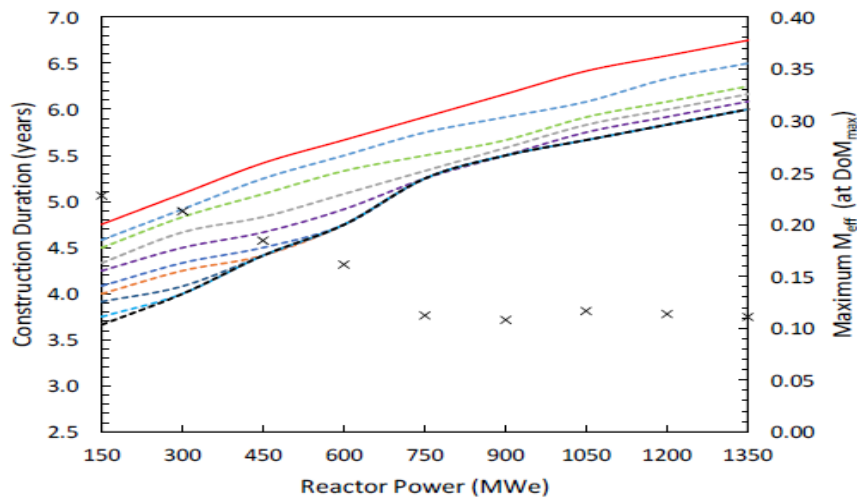
❖ 새울 1,2호기 (Electrical Equipment Room in Auxiliary Building)



1 타당성 검토

❖ 주요 결정 요인

- 1) 현장 위치
- 2) 사업 환경 (시장 상황, 경쟁 강도 등)
- 3) 프로젝트 특성 (규모, 수량, etc.)
- 4) 현지 노동 여건
- 5) 프로젝트 위험



❖ 모듈화 지수 (Modularization Indicator)

- 1) 모듈화 범위 (Extent of Modularization) : 건축 작업의 마감 요소(건물 정면 등)를 모듈화하면 추가 일정 단축이 거의 발생하지 않으며 M&E, 배관, 장비, 라이너 및 구조물이 모두 모듈화되면 '완전한' 모듈화 이점이 효과적으로 달성된다는 것을 나타냄.

▪ None / Low / Medium / Full

- 2) 모듈화 정도 (Degree of Modularization) : 현장 시공 물량

$DoM = 0.0$ & 모듈샵 제작 물량 = DoM_{max} .

▪ $0 \leq DoM \leq DoM_{max,i}$

2 Risk 요인

1) 모듈 운송

- 모듈 분할 (모듈 분할 인자 = MDF, Module Division Factor)
- 운송가능한 모듈 크기 : Envelope 1~3

2) 모듈 인양과 지지대

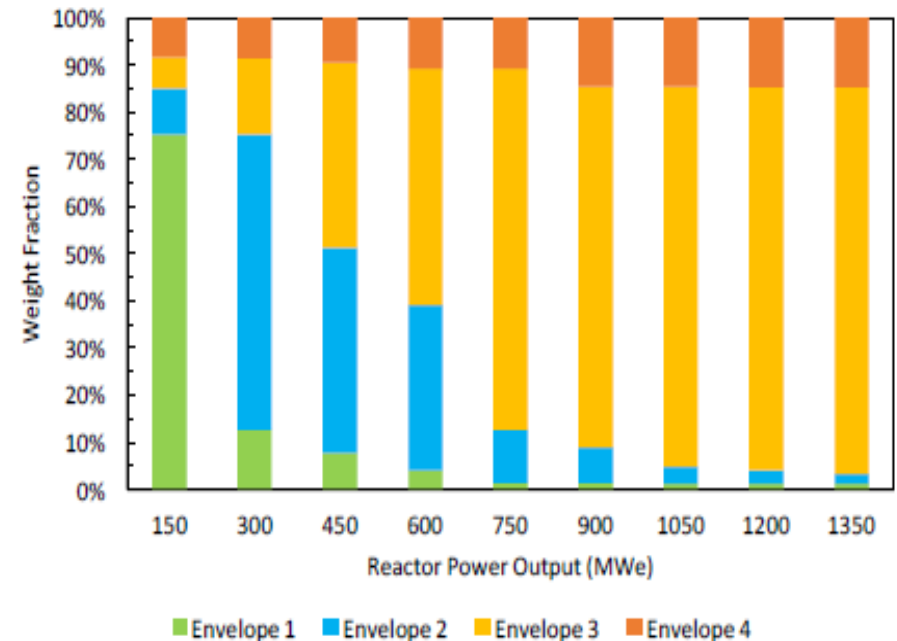
- 3) 모듈화로 인한 추가 비용 (추가적인 지지대 및 Bracing, 설계 비용)

4) 연속 생산

5) 제작상의 어려움, 복잡성

6) 인허가

Transport Envelope	Weight (te)	Length (m)	Width (m)	Height (m)	Notes
1	ISO: 28.8 C&U: 44.0	ISO: 12.032 C&U: 16.5 ²	ISO: 2.34 C&U: 2.55	ISO: 2.292 C&U: 4.95	ISO standard container is used for the module's size ISO containers meet C&U (and STGO Category 1) requirements Rail, road, barge transport possible
2	80	18.65	2.9	4.95	Routine relaxation of C&U limits C&U dimensions but STGO Cat 2 weight limit
3	150	30.0	6.1	4.95	Large loads within STGO Category 3 restrictions 2 days notice to police plus other req's; vehicle must be attended
4	> 150	> 30.0	> 6.1	> 4.95	Special Order loads Barge transport is preferred Permission must be obtained from HE ALL team



3 효과 극대화

- 1) 설계 관리 : 프로젝트 초기에 설계를 확정하는 것은 전체 프로젝트 일정을 유지하기 위한 필수적인 요소

- 2) 기능적 & 물리적 통합

- 제품의 기능적 성능과 물리적 무결성에 대한 간섭이나 손실 방지

- 3) 인터페이스 관리 및 최소화

- 신속한 설치 가능

- 4) 표준화

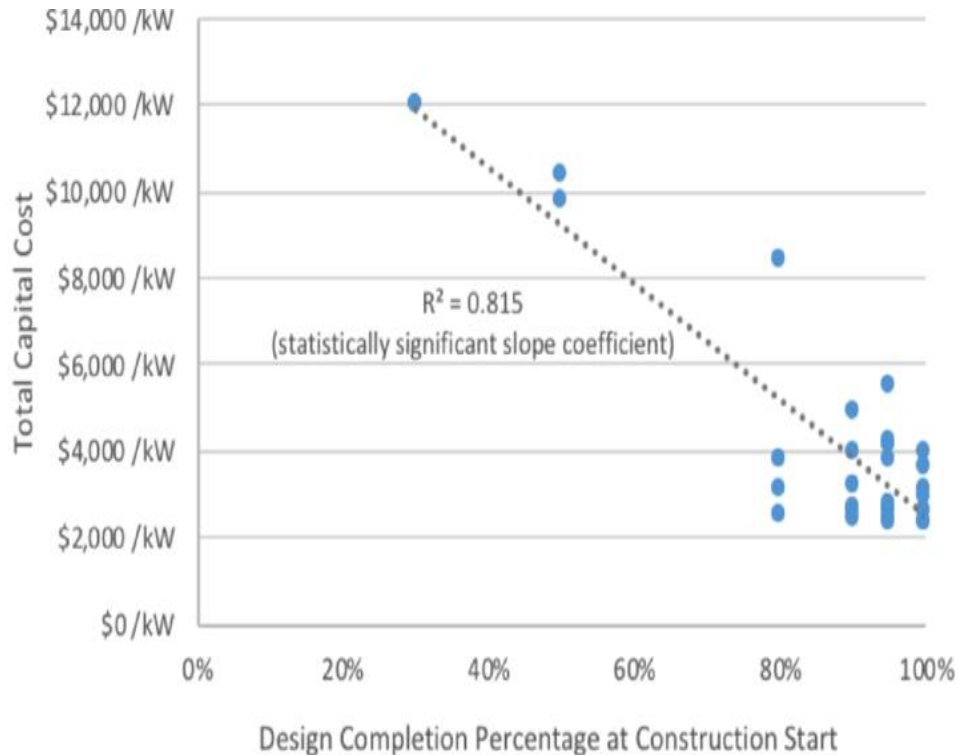
- 반복성 향상을 통한 생산성 향상

- 5) 조기 Outfitting

- 설치 및 테스트 시간 절약

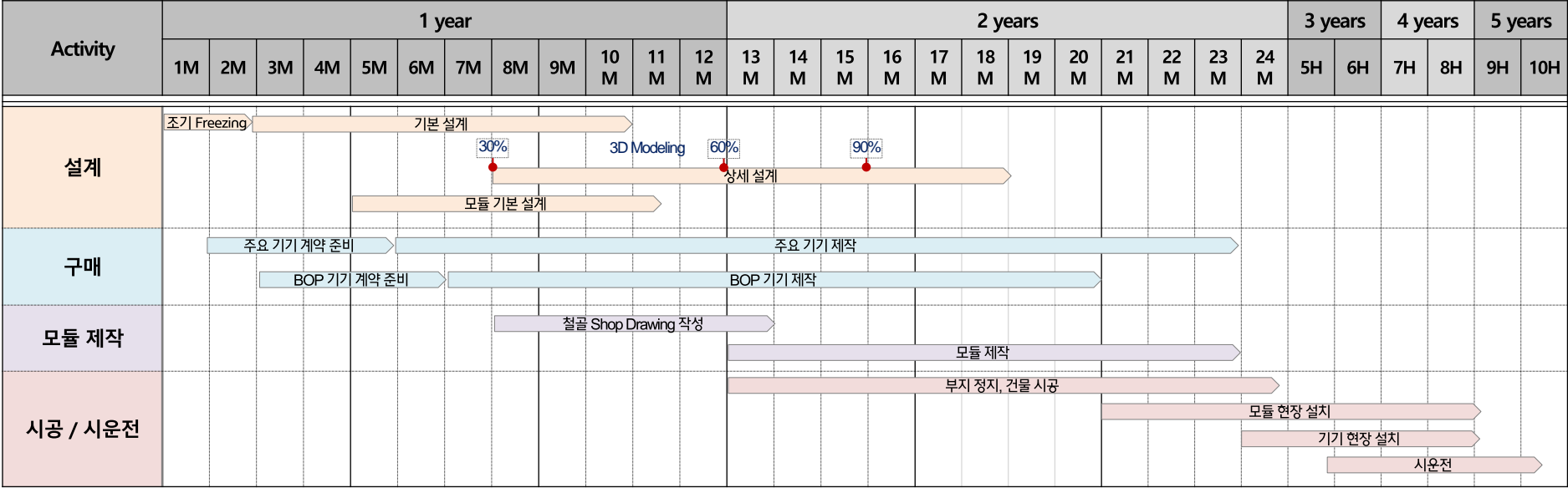
- 6) 공급망 및 프로젝트 관리

- 프로젝트 지연 위험 최소화 및 생산 일관성 유지

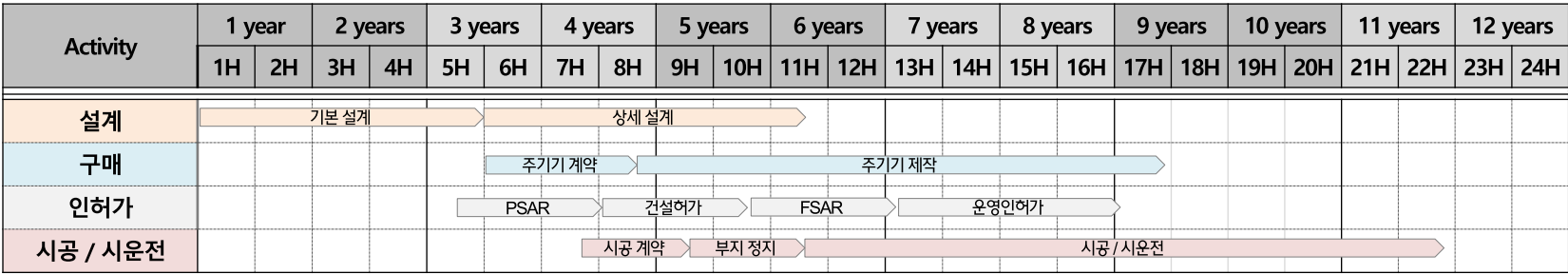


4 스케줄 비교 : 모듈화 플랜트 프로젝트 vs 원자력발전소 프로젝트(정성적 비교)

❖ 모듈화 플랜트 프로젝트



❖ 국내 원자력발전소 프로젝트



❖ 주요 공기 차이

1) 모듈 설계/구매/제작/시공/시운전에 따라서 각각 4년, 2년, 4년 차이가 발생 차이 발생

5 제안 사항

- 1) 모듈화 개념을 반영된 인허가 받은 표준설계에 대해서 건설/운영인허가 통합 필요 (조기 모듈 제작 발주 가능)
- 2) 설계/구매/모듈제작/시공/시운전을 종합적으로 고려한 한국형 모듈 공법 개발 필요
- 3) 타 산업(화공 산업등)에 Lesson & Learned을 적극 반영 필요
- 4) 비안전등급계통의 모듈화 극대화를 우선적으로 추진하여 인허가 Risk 회피
- 5) 기본설계 착수에 앞서 설계 초기 Freezing 개념 도입을 통해 Critical Path에 해당하는 주기기 제작, 모듈 제작을 선제적으로 착수하여 전체 스케줄 단축
- 6) Critical Path에 해당하는 계통, 건물에 한하여 초도 호기에 우선적으로 모듈화를 적용하고, 후속 호기에서 점진적으로 확대
- 7) 건물 내부에 대부분의 기기들이 설치되는 원자력 발전소 특성을 고려하여 복합 모듈 위주의 적용 검토
- 8) 해안/내륙 지역별 모듈화 적용 표준화 설계 방안 검토

감사합니다