

3 원자력발전과 ASME

글 조위영 \ 품질경영부 부장 \ 전화 02-3433-7365 \ E-mail piriboy@ssyenc.com

1. 머리말

발전사업을 우리의 미래 성장 동력으로 선정하고 원자력발전 시장 진입을 위하여 지난 1년간 KEPIC 인증에 이어 ASME 인증 업무를 추진하고 있는 시점에, 원자력에 대한 우리의 희망과 미래 에너지로서의 위상에 대하여 살펴보고자 한다.



[그림 1] 한국형 원자로 APR 1400 신고리 4호기 원자로 증기발생기¹⁾

2. 원자력과 에너지 문제

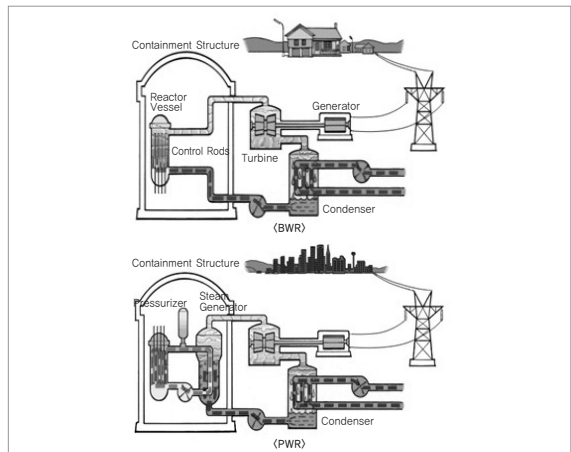
2-1. 후쿠시마 사고

지난 2011년 3월 11일 일본 동북부 지방에 규모 9.0의 강진과 초대형 쓰나미가 강타하여 후쿠시마 원전이 침수되는 과정에서 원자로가 용융(Melt Down)되는 최악의 원전사고가 발생했다.

표 1 일본의 원자력발전 현황²⁾

노형	PWR 가압경수로	BWR 비등경수로	계
운영중	24	30	54
건설중	0	2	2
건설 준비	2	8	10

특히 현재의 기술로는 누출된 방사능을 일정 수준 이하(20mCv)로 낮추는 것이 불가능하여 일본 정부에서 공식적으로 방사능 제거작업을 포기하기로 함에 따라 사태의 심각성과 원전사고가 자국 내의 문제로 국한 되지 않는 범지구적인 문제임을 다시금 깨닫게 하였다.



[그림 2] 일본의 BWR 비등가압경수로(위)²⁾와 우리나라의 PWR 가압경수로(아래)¹⁾ 시스템 비교도 : BWR은 방사능에 노출된 증기가 직접 터빈을 구동하는 시스템인데 비해 PWR은 증기발생기를 통하여 간접적으로 열 교환을 하는 방식으로 1차 축과 2차 축이 완전히 분리되어 있어 방사능에 오염된 증기가 누출될 가능성이 원천적으로 차단되어 있다는 점이 가장 큰 차이점이다.

표 2 국내 원전과의 안전성 비교

구분	BWR 일본	PWR 한국
원자로상태	비등	과냉각
원자로 온도	285℃	286℃
계통압력 ⁹⁾	76kg/cm ²	160kg/cm ²
원자로제어 ⁹⁾	<ul style="list-style-type: none"> • 기동시 : 제어봉 삽입, 인출 • 정상운전(30~100%) : 노심 순환 기포유량제어 	<ul style="list-style-type: none"> • 냉각재 보온 출력제어 • 제어봉 : 100% 제어
터빈계통	원자로냉각재가 순환	1차 측과 2차 측 완전 독립
노심냉각	압력억제실	노심냉각시스템
격납건물	<ul style="list-style-type: none"> • 두께 1.2m 이상 격납건물 • 자유체적 거의 없음 	<ul style="list-style-type: none"> • 두께 1.2m 이상 강철을 포함한 격납건물 • 충분한 자유체적
설계특성	원자로에서 증기발생	증기발생기에서 증기발생
구조적 안정성	<ul style="list-style-type: none"> • 정지신호 발생 시 원자로 하부에 설치된 제어봉이 탱크에 저장된 질소 압력으로 노심에 삽입 • 격납용기 자유체적이 작아 수소 발생 시 수용능력 및 대처능력 미흡 	<ul style="list-style-type: none"> • 정지신호 발생 시 원자로 상부에 설치된 제어봉이 노심으로 자유낙하(구동원 필요 없음) • 충분한 격납용기 자유체적 보유로 수소생성에 대비한 안정성 확보
사고시 환경영향	원자로에서 발생한 증기가 터빈에 직접 공급됨으로 계통파단 시 방사성물질이 외부로 누출될 가능성이 높음	원자로 냉각재와 급수 및 증기계통이 격리되어 있어 계통파단 시 방사성 물질이 외부 누출 가능성이 낮음
전원상실시	<ul style="list-style-type: none"> • 터빈구동 고압노심살수펌프로 원자로에 냉각수 주입 • 노심을 냉각하면서 생성된 증기는 격납용기 하부의 압력억제물 내부 저장수로 배출 • 원자로 격납용기 압력상승에 따라 증기 대기방출 불가피 (방사성물질을 포함한 공기가 외부로 방출됨) 	<ul style="list-style-type: none"> • 터빈구동 보조급수펌프로 증기발생기에 급수 주입 • 원자로 냉각재는 증기발생기에서 열교환시 생기는 온도차에 의해 자연적인 흐름을 유지하며 냉각(자연 순환) • 증기발생기에서 열 교환하며 만들어진 증기는 대기로 방출(방사성물질 불포함)
수소제어	수소제어설비 없음	<ul style="list-style-type: none"> • 고리 1호기는 전원이 필요 없는 피동축매형 수소재결합기 설치 • 신고리 1, 2호기 이후 신규 원전에는 수소 정화기(전원 필요)와 피동축매형 수소재결합기를 설치하여 수소제어 • 기타 원전에는 수소 재결합기(전원 필요) 또는 정화기 설치

2-2. 대규모 정전사태

2011년 9월 15일 이상기온으로 막바지 무더위가 한창 기상을 부리던 오후 3시경 예비전력 400만kW 아래로 떨어지자 대한민국에서는 처음으로 전국적인 제한 송전을 실시하는 사건이 발생하였다.



[그림 3] 현대문명은 에너지를 기반으로 하고 있다. 따라서 지속적인 에너지공급이 필수적이다(전국적인 대규모 정전사태를 빚던 카툰⁷⁾).

사태는 일파만파로 먼저 급기야 지식경제부장관, 차장, 한국전력 부사장, 전력거래소 이사장 등이 줄줄이 사태의 책임을 지고 경질되거나 사퇴했다.

이 두 사건은 에너지라는 시각에서 보면 완전히 상반된 결과를 가져왔다.

후쿠시마 사고 이후, 독일은 2022년까지 원전을 폐쇄하고 신재생 에너지로 대체⁸⁾ 하겠다는 선언을 했으며, 세계 여러 나라에서도 원자력발전에 대하여 유보적인 태도를 취하고 있다. 특히 환경단체의 반핵주장은 더욱 거세져 급기야 ‘핵’이라는 글자로 시작하는 모든 것을 반대⁹⁾ 하기에 이르렀다.

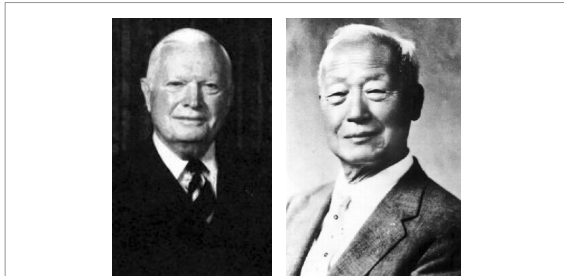
한편 대규모 정전사태는 발전설비의 확충을 구간으로 하는 전력 수급정책을 재점검하는 등 긍정적인 여론의 힘을 입어 구간 지지 부진하던 전력사업에 다소의 힘을 얻는 듯하다.



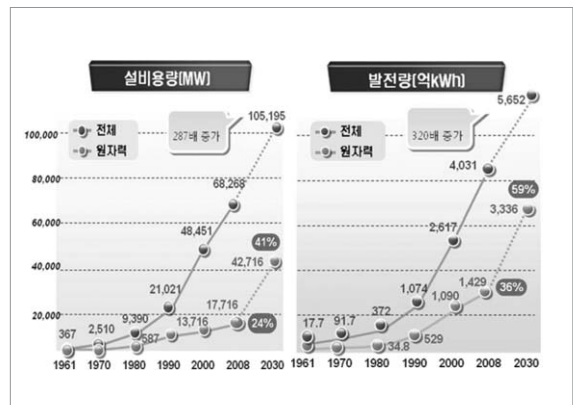
[그림 4] 최근 부산고법은 송전탑건설허가를 반려한 가장군에 위법판결을 내렸다. 이로써 신고리원전은 운전허가를 받지 못하여 전력을 공급 못하는 국가적 재난 사태에서 벗어나 경남북부지역의 안정적인 전력을 공급할 수 있게 되었다(신고리 1, 2호기¹⁰⁾).

1948년 북한의 일방적인 송전 중단 이후, 전쟁의 폐허 위에 우리나라가 이렇게 경제대국으로 일어설 수 있었던 것은 화력, 석유정제, 자동차, 철강, 전자 등 수출산업국으로서 든든한 초석 역할을 한 상대적으로 저렴하고 안정적인 전력 덕택이었으며, 선대 선각

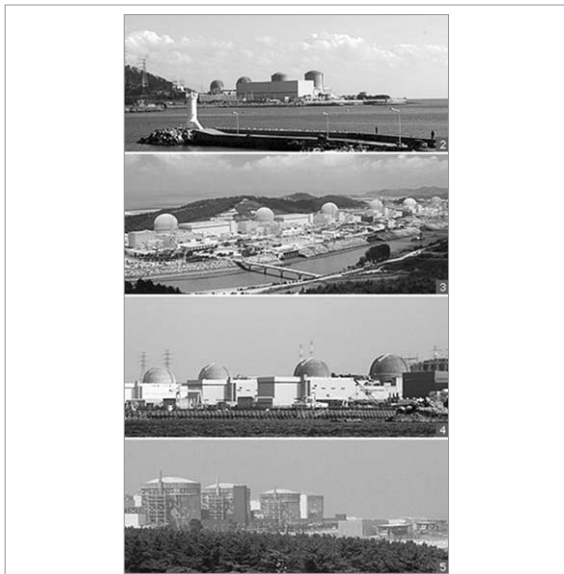
자들의 과감한 원자력 도입으로 오늘날 우리가 그 혜택을 입고 있다는 것을 잊지 말아야 할 것이다.



[그림 5] 미국 전기기술의 대가인 워커 시슬러(좌)는 1956년 이승만 대통령(우)을 만나서 전력산업 기반의 중요성을 역설했고, 당시 이승만은 원자력의 무한한 발전가능성을 알아봤다.¹⁰⁾



[그림 8] 2030년까지 우리나라의 원자력 비중은 발전량 기준으로 59%까지 확대해 나갈 계획이다.



[그림 6] 위로부터 고리원자력발전소, 영광원자력발전소, 울진원자력발전소, 월성원자력발전소¹²⁾

표 3 국내 신규 원전 건설계획

구분	건설 중(~2014년)	준비 중(~2021년)	계획 중(~2030년)
수량	7기	4기	8기
위치	신고리2 신월성1, 2 신고리3, 4 신울진1, 2	신고리5, 6 신울진3, 4	신고리7, 8
발전량	8,600MW	5,600MW	9,800MW

3. 원자력 역사

3-1. 우라늄

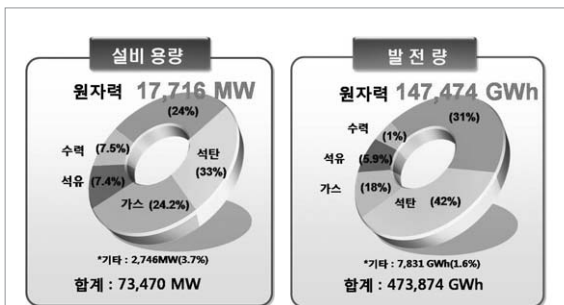
뢴트겐이 X선을 발견한 이래, 1896년 베크렐¹⁴⁾은 우라늄 광석도 일종의 X선이 나온다는 사실을 발견하면서 이 광선을 '우라닐 광선'이라고 부른 것이 최초의 발견이며, 원자력의 역사는 1938년 오토 한과 프리츠 슈트라스만이 독일의 실험실에서 중성자를 이용하여 우라늄 원자핵을 분열시키는데 성공함으로써 시작되었다고 할 수 있다.

3-2. 인류가 만든 최초 원자로 시카고 파일

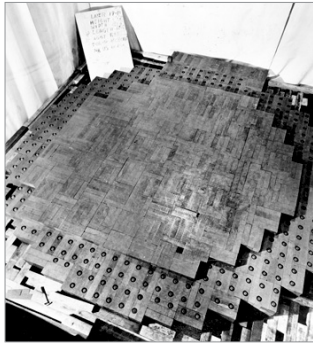
1942년 시카고대학 운동장 스탠드 아래 스쿼시 코트에서 페르미와 스릴라드는 우라늄과 흑연을 차례로 쌓아 높이 7m, 지름 7m의 원형 파일(Pile) 형태의 원자로를 만들어 원자핵 연쇄 핵분열 반응실험에 성공했다.

3-3. 자연이 만든 원자로 오클로

1975년 아프리카 오클로 광산에서 20억년 전 50만년 동안 사용된 자연 원자로를 발견하였다. 10여개가 발견된 이 우라늄광산



[그림 7] 오늘날 우리나라는 세계 6위의 원전설비 보유국으로 원자력발전이 전체 전력의 31% 공급을 담당하고 있다.¹³⁾



[그림 9] 최초의 원자로 시카고 파일(Chicago Pile No.1 CP-1)¹⁶⁾ 흑연과 우라늄을 차례로 쌓은 형태이다.



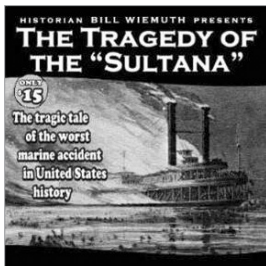
[그림 10] 아프리카 가봉의 오클로 광산

노천 원자로가 핵반응¹⁶⁾에도 불구하고 폭발하지 않은 이유는 주위의 물이 감속제 역할을 하여 서서히 가동되었기 때문인 것으로 보인다.

4. ASME(미국기계학회)

4-1. 표준과 규격

1800년대 미국은 각종 기계의 발명, 값싼 노동력의 유입, 풍부한 자원을 토대로 한 산업혁명으로 공업국가로서 비약적 발전을 이룬



[그림 11] 1865년 증기선 Sultan이 미시시피강에서 보일러 폭발사고로 침몰하여 승객 1,238명이 사망하였다.¹⁷⁾

다. 하지만 당시 광산, 수송, 생산시설에 필수적인 증기기관의 보일러 폭발로 인한 많은 인명사고로 사회적 문제가 대두되어 보일러에 있어 안정성 확보를 위한 규제 및 표준이 필요하게 되었다. 이런 사회적인 요구에 따라 1907년 8월 메사추세츠 주에서 최초로 Board of Boiler Rules를 설립하면서 보일러 설계에 관한 법령을 발표하였고, 주마다 다른 보일러 규격의 문제점을 개선하여 1915년 2월 ASME Boiler Code인 Section I Power Boiler의 발행을 시작으로 오늘날과 같은 방대한 양의 ASME Code로 발전하기에 이르렀다.



[그림 12] ASME 하면 단순히 Code인 BPVC¹⁸⁾만을 생각하기 쉬우나 그 영역은 생명공학에서부터 우주항공까지 다양하다.

ASME KnowledgeBase Events Groups Search

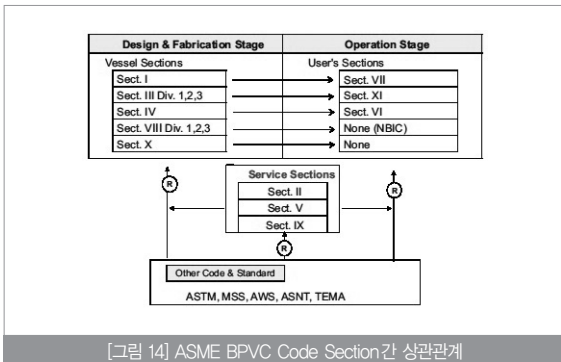
Engineering Groups at ASME: Get Involved with ASME

Educational Resources	Help bring solutions to communities across the world or in your own town
Districts & Local Sections	
Social Media & Online Groups	ASME sponsors and works with outreach and development groups to improve life in emerging and impoverished populations all over the world.
Technical Divisions and Institutes	Experienced engineers work along young engineers and local residents to develop workable solutions for tough conditions with a cross-disciplinary approach.
Programs & Committees	Learn more about:
Volunteer Resources	Engineering for Change > Engineers Without Borders - USA >
ASME Foundation	ASME's Global Communities >

[그림 13] ASME 홈페이지. 1880년 설립된 ASME¹⁸⁾는 6개의 Supervisory Board 및 4개의 Advisory Board, 700개 이상의 Committees를 거느리고 있고, 현대 기계산업을 대표하는 가장 권위 있는 민간 엔지니어 단체이다.

표 4 ASME BPVC 구성

Sections	
I	Rules for Construction of Power Boiler
II	Materials
III	Subsection NCA-General Requirements for Division 1 and Division 2 • Division 1 • Division 2 Code for Concrete Containments • Division 3 Containment for Transportation and storage of Spent Nuclear Fuel and High Level Radioactive Material and Waste
IV	Rules for Construction of Heating Boilers
V	Nondestructive Examination
VI	Recommended Rules for the Care and Operation of Heating Boilers
VII	Recommended Guidelines for Care of Power Boilers
VIII	Rules for Construction of Pressure Vessels • Division 1 • Division 2 Alternative Rules • Division 3 Alternative Rules for Construction of High Pressure Vessels
IX	Welding and Brazing Qualification
X	Fiber-Reinforced Plastic Pressure Vessels
XI	Rules for In-service Inspection of Nuclear Power Plant Components
XII	Rules for construction and continued service of Transport Tanks



[그림 14] ASME BPVC Code Section간 상관관계



[그림 15] ASME BPVC Section. III의 Div.1간 상관관계

표 5 N-Type Certificate Holder

Scope of Works	
	Nuclear vessels, pumps, valves, piping systems, storage tanks, core support structure, and concrete containments
	Field installation and shop assembly
	Fabrication, with or without design responsibility for Nuclear appurtenances and parts
	Pressure relief valves
	Nuclear supports
	Containment for spent fuel, radioactive material and waste

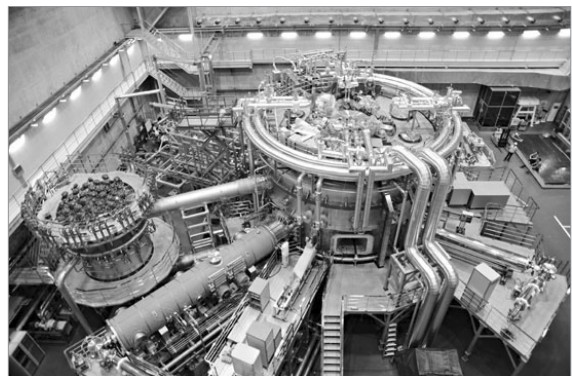
주) 당사가 취득예정인 인증분야는 NA, NPT 이다.

5. 맺음말

원자력은 관리에 따라 재앙을 몰고 올 수도 있고 값싸고 깨끗한 전기를 공급하기도 하는 두 얼굴의 에너지이다. 이러한 원자력 발전에 대하여 석유도, 석탄도, 대안도 없는 우리의 현실에 발을 딛고 이성적으로 바라보자.

에너지 자원의 97%를 수입에 의존하는 나라, 발전량 기준 31%를 원자력발전이 차지하는 나라, 이산화탄소를 2009년 기준 연간 5.3억 ton을 배출하는 세계에서 여덟 번째 온실가스 배출국인 나라이다.

우리에게 있어서 원자력은 대안없는 선택이다. 특히 대규모 정전 사태 이후 블랙아웃 우려마저 제기되는 우리의 에너지 수급 구조에서 원전비중을 감소하거나 제외하는 것은 현실적이지 못하다.



[그림 16] 한국의 별 KSTAR²⁰. 미래 핵융합에너지 개발을 위해 지난 1995년에 착공하여 11년간 건설하여 2007년 완공한 세계 최고 수준의 핵융합 연구장치이다.

그러나 안전성이 확보되지 않으면 원자력산업의 발전은 기대하기 어렵다. 특히 방사선 안전은 종사자뿐만 아니라 지역주민에게가

지 직결되기 때문에 원자력 안전은 아무리 강조해도 지나치지 않는다.

이제는 안전을 넘어서 안심하는 수준으로 원전을 레벨업하는데 최선을 다해야 할 것이다. 이런 측면에서 원자력이라 함은 모름지기 국격이며, 신재생에너지가 신인류를 에너지의 위기에서 구원하는 그 날까지 유일한 대안이며, 현재로서는 지구 온난화에 대처할 수 있는 유일한 수단인 것이다. S

참고문헌

- ① ASME Code Addenda(2011)
- ② 국가에너지기본계획(지식경제부, 2010, 12)
- ③ 원자력, 대안은 없다(클로드 알레그르, 서균열)

- 1) APR 1400은 2,346억 원을 투입하여 1992년부터 10여 년에 걸쳐 우리나라에서 자체 개발한 3세대 신형원자로 신고리3, 4호기와 신울진1, 2호기에 이어 UAE에도 적용한다(출처 : 동아일보 DB).
- 2) 간 나오토 일본 총리는 2011. 7. 12 회견에서 2030년까지 원자력발전이 차지하는 비율을 53%로 높인다는 일본 정부의 에너지 정책을 백지화하겠다고 밝힌 바 있어 표에서 건설 준비로 표기된 10기는 취소될 가능성이 매우 높다.
- 3) BWR(Boiling Water Reactor) : 비등형경수로, 일본 후쿠시마 원전은 가동한 지 40년이 넘는 노후한 비등형경수로로 원리상 화학발전소의 보일러 대신 원자를 넣은 것으로 계통이 파단 되면 방사성 물질이 바로 외부로 유출되기 쉽다. 또한 가압기와 증기발생기가 없어 격납고가 대단히 작아 냉각수 유출로 과열된 노심 내에서 수증기로 인해 발생한 수소로 인한 폭발에 매우 취약한 구조를 가지고 있다.
이는 이미 1972년 미국 원자력위원회(AEC)에서 "1호기 원자로 모델은 대형 동 모델에 비해 폭발에 취약하고 방사능 누출 위험이 더 크다"고 한데 이어 지난 1986년 미국 원자력규제위원회(NRC)에서 "이 모델의 크기와 내압 능력 때문에 격납 기능에 사고가 발생할 확률이 90%"라고 지적한 바 있다.



[그림 17] 일본의 BWR 격납고(좌), 한국의 PWR 격납고(우), 가운데 원자로의 크기를 기준으로 보면 우측의 동 형태의 격납고가 자유체적이 될듯 큰 것을 알 수 있다(화살표 부분 : 수소분자).

- 4) PWR(Pressurized Water Reactor) : 가압경수로
- 5) PWR은 원자로 내부를 160kg/cm²으로 가압하여 물의 온도를 286℃까지 올리더라도 비등하지 않은 과냉각 상태를 유지하도록 증기발생기와 가압기를 설치한다. 따라서 원자로 계통이 높은 압력을 견디게 설계되어 있다. 급수기열로 생성된 증기로 터빈을 구동한다.

- 6) BWR은 원자로 내부 물(냉각재)을 비등시켜 바로 터빈을 구동하므로 증기발생기를 줄일 수 있어 발전소 계통을 단순화시켜 크기를 줄이고 계통압력이 낮아 원자로 용기 두께를 얇게 만들 수 있어 경제성을 향상시킬 수 있는 이점이 있다.
- 7) 출처 : 조선일보 DB
- 8) 신재생에너지를 에너지의 공급의 근간으로 삼을 수 없는 이유는 간단하다. 언제 바람이 불 지 알 수 없기 때문이다. 그럼에도 불구하고 세계 주요 국가들이 신재생에너지를 포기하지 않는 것은 미래를 위한 대비이기도 하지만 그 배경에는 산업 경제적 요인이 더 크다. 기술을 선점해 이를 상품화시켜 새로운 성장 동력으로 삼겠다는 계산이 깔려 있다.
- 9) 환경운동에 있어 원자력무기와 원자력발전소는 구분할 필요가 있다. 당장 원자력에서 벗어나기 위해선 화석연료로 대체할 경우 이산화탄소를 대량 배출해야 하는 자기당착에 빠지게 된다. 풍력을 하려면 발전기를 수십만 개를 설치해야 한다는 점을 직시해야 한다. 현재의 기술로는 신재생에너지는 자원의 무한성 외에는 별다른 장점이 없다. 대안 없는 원전 반대 주장은 현실에 맞지 않는다. 반핵을 하더라도 이성적이고 과학에 근거한 정착성이야말로 많은 사람들의 공감대를 형성할 수 있을 것이다.
- 10) 출처 : 파이낸셜 DB
- 11) 원자력진흥법(1958. 3. 11 제정)은 건설산업의 근간 기본인 건설산업기본법(1958. 3. 11 제정)과 함께 만들어졌을 만큼 우리나라는 원자력에 관한 한 역사가 깊다. 1956년에 워커 시슬러가 이승만 대통령을 방문하면서 "우라늄 1g이면 석탄 3ton의 에너지를 낼 수 있다. 한국은 자원빈국이 아니다. 석탄은 땅에서 캐는 에너지이지만, 원자력은 사람의 머리에서 캐내는 에너지다"라고 원자력의 중요성을 역설한 후 불과 2년 만에 원자력진흥법을 만들었고 이듬해인 1959. 3. 1 불모지나 다름없는 당시에 한국원자력연구소 설립한 것을 보면 이승만 대통령의 혜안에 놀라울 따름이다.
- 12) 출처 : 한수원 홈페이지
- 13) 출처 : 전력통계속보(2010년 말 기준). 참고로 프랑스의 경우 총 전력의 80%를 원자력이 담당하고 있다.
- 14) 프랑스 물리학자 앙투안 앙리 베크렐(1852~1908)의 업적을 기려 방사능물질이 방사능을 방출하는 능력을 측정하기 위한 국제단위로 베크렐(Bq)을 사용하고 있다. 또 다른 방사능 단위로 큐리(Ci, 마찬가지로 큐리 부부를 연상할 수 있을 것이다)가 있으며 1 Ci는 3.7 x 10¹⁰ Bq 이다.
- 15) 출처 : 네이버 홈페이지
- 16) 핵반응이라는 용어는 화학반응에 대응하는 용도로 쓰게 된 것으로 핵분열과정은 실제 화학반응과는 전혀 다른 것이다.
- 17) Boiler에 관한 최초의 ASME Code가 제정되기 전인 1895년~1905년 사이 미국에서만도 3,612건의 보일러 사고로 76,000명이 사망할 정도로 보일러 폭발사고는 당시 사회적으로 매우 심각한 문제였다.
- 18) BPVC : Boiler and Pressure Vessel Code로 Code는 3년 마다, Addenda는 연 1회마다 발행하며 현재 2010년 Edition에 2011년 Addenda까지 발행되었다. 2012년 이후부터는 Edition과 Addenda의 개념을 하나로 합쳐 2년마다 발행된다고 한다.
- 19) ASME : The American Society of Mechanical Engineers. 대표적인 BPVC는 총 12 Section으로 이루어져 있으며 특히 당사의 ASME 인증업무와 관련 있는 원자력 압력용기 관련 Code는 Section III Rules for Construction of Nuclear Facility Components 이다.
미국에서는 원자력분야 인증을 기계기술자 단체인 ASME에서 수행하는데 반해 한국은 대한전기협회(KEA)에서 인증업무를 하는 데에는 나름 역사적 배경이 있다.
미국에서 초창기 보일러는 주로 증기기관의 스팀을 생산하는 설비로 전기와는 무관하여 기계기술자들이 단체를 구성하게 된 것이고, 1995년 첫 개발된 한국의 KEPIC 규격은 대규모 보일러가 사용되는 발전소 사업자가 한전인 탓에 관련 단체인 대한전기협회가 주관하게 된 것이다.
- 20) KSTAR : Korea Superconducting Tokamak Advanced Research