



FUKUŞİMA NÜKLEER SANTRAL KAZASI



Kaza Hikayesi, Geline Son Durum Özeti ve Kazanın Etkileri

Veda DUMAN
Nükleer Enerji Yüksek Mühendisi

Aralık, 2011

TMMOB

Fizik Mühendisleri Odası

ISBN: 978-605-01-0226-0

Baskı: Mattek Matbaacılık Bas. yay. Tan. San. Tic. Ltd, Şti.

Adakale Sokak 32/27 Kızılay / Ankara

Tel: 0312 433 2310

ÖNSÖZ

11 Mart 2011 tarihinde Japonya’da meydana gelen 8.9 şiddetindeki tarihin en büyük depremi sonucu oluşan tsunaminin Fukuşima Dai-ichi Nükleer Santrali’nin 1,2,3 ve 4 nolu ünitelerini etkilemesi sonucu nükleer kazaya sebep olmuştur. Olayın ilk günlerinde yaşanan büyük bilgi kirliliği nedeniyle farklı değerlendirmeler yapılmış, maalesef konu ile ilgili bilgisi olmayanların aşırı ilgisi sonucu yazılı ve görsel basında çok farklı haberler ile kamuoyu eksik ve hatta kimi zaman yanlış bilgilendirilmiştir.

Odamız Nükleer Enerji İhtisas Komisyonu marifetiyle kazanın ilk gününden itibaren Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA) ve diğer güvenilir kaynaklardan alınan bilgiler kazayı takip eden günlerde kamuoyuna aktarılmış, bu yolla bir nebze de olsa doğru bilgilendirme yapılmaya çalışılmıştır.

Fizik Mühendisleri Odası olarak bu raporu hazırlamakla; dünyada en büyük üçüncü nükleer santral kazası olan Fukuşima Nükleer Santral kazası ardından, bugüne kadar olan tüm gelişmeler aktarmak, kazanın sonuçları hakkında kamuoyunu bilgilendirmek ve kalıcı bir eser ortaya koymak amacıyla hazırlanmıştır. Raporunda, Fukuşima Nükleer Santrali hakkında genel bilgiler verilmiş olup oluşan doğal afet sonucu meydana gelen nükleer kaza ayrıntılı olarak anlatılmış, gelinen son durum aktarılmış ve kazanın çevresel etkileri, günümüze kadar elde edilen bilgiler ışığında ulaşılan sonuçlar ve kazadan çıkartılacak derslerden ayrıntılı olarak bahis edilmiştir.

Bu raporu Odamız adına hazırlayan üyemiz Nükleer Yüksek Mühendisi Sn. Veda DUMAN’a, ayrıca çalışmaya katkı koyan odamız eski Yönetim Kurulu Üyesi ve II. Başkanı Fizik Yüksek Mühendisi Sn. H. Burçin OKYAR’a ve raporun hazırlanması sırasında desteğini esirgemeyen Sn. Yard. Doç.Dr. Şule ERGÜN’e teşekkür ederim.

Dr. Abdullah ZARARSIZ
Yönetim Kurulu Başkanı

İÇİNDEKİLER

Önsöz

1.Giriş	7
2.Fukuşima Nükleer Santrali Kaynamalı Su Reaktörleri (BWR)	8
3.Fukuşima Nükleer Santral Kazası	11
4.Fukuşima Nükleer Santrali Reaktörlerinin Son Durum Özetleri	18
5.Kazanın INES Ölçeği ile Derecelendirilmesi	19
6.Çevreye Yayılan Radyoaktif Maddeler	23
7.Kaza Sebebiyle Yaşanan Radyasyon Etkilenmeleri	25
8.Tokyo Elektrik Güç Şirketi'nin Fukuşima Eylem Planı .277	
9.Kazadan Çıkarılan Dersler .300	
10.Sonsöz	36
11.Kaynakça	38

Şekil Listesi

Şekil 1. Kaynamalı Su Reaktörü (BWR) ve Mark I tipi Koruma Kabı.....	8
Şekil 2. Kaynamalı Su Reaktörü'nün iç yapısı	9
Şekil 3. Atık Isı Uzaklaştırma Sistemi (RHR).....	13
Şekil 4. Yüksek Basıncılı Soğutucu Enjeksiyon Sistemi (HPCI).....	14
Şekil 5. Basıncı Düşürme Sistemi ve ECCS Ağı.....	15
Şekil 6. Alçak Basıncılı Soğutucu Enjeksiyon Sistemi (LPCI)	15
Şekil 7. RCIC Sistemi	17
Şekil 8. INES Ölçeklendirme Sistemi	20
Şekil 9. Fukuşima Santrali- Dekontaminasyon Binaları	28
Şekil 10. Hasarlı ünitelerin etrafına yapılacak kaplama çalışmaları	29
Şekil 11. İnşaatı devam eden kaplama binası (1. ünitenin etrafında).....	29

Tablo Listesi

Tablo 1. Fukuşima ve Çernobil Kazalarının Karşılaştırılması	21
Tablo 2. Çalışanlar için doz değerleri [4].....	26
Tablo 3. Fukuşima Nükleer Kazasından Çıkarılan Dersler ve Öneriler.....	33

1. Giriş

11 Mart 2011'de Japonya tarihinin en büyük deprem felaketi ile karşı karşıya kalmıştır. Richter ölçeğine göre 8.9 şiddetindeki bu depremin ardından ada ülkesi bu kez de tsunami felaketi ile yüz yüze gelmiştir. Maalesef, dev dalgaların 10-15 metre yüksekliğe ulaştığı büyük araçları, evleri, gemileri, bazı binaları yerinden alıp kıyılardan kilometrelerce içeriye sürüklediği görülmüştür. Bu dev dalgalar yaşanan can kaybında ciddi artış olmasına sebep olmuştur. Deprem ve tsunami felaketi neticesinde yaklaşık 15000 insan hayatını kaybetmiş ve 4000 kişinin ise kayıp olduğu rapor edilmiştir. Resmi makamların yaptığı açıklamalara göre felaketlerin ardından hayatını kaybedenlerin sayısının 18000'in üzerine çıkacağı tahmin edilmektedir.

Japonya'da toplam 19 nükleer santral sahasında kaza sonrasında işletimde olan toplam 50 adet nükleer reaktör mevcuttur. Bu reaktörler ile 2010 yılında toplam 279229.53 GWh(e) güç üretilmiştir [1]. Deprem ile birlikte tüm reaktörlerde kapanma işlemi prosedürlere uygun olarak gerçekleşmiştir. Deprem anında devreye girerek reaktörlerdeki reaksiyonun sönümlemesini sağlayan güvenlik sistemleri başarıyla çalışmıştır. Kapamanın ardından radyoaktif bozunma ısısını sistemden çekmek üzere soğutma sistemleri de başarılı bir şekilde devreye girmiştir. Ancak depremin ardından kapatma ve soğutma işlemleri gerçekleştirilen santrallerden bir kısmı, depremden 56 dakika sonra gelen tsunamiden de etkilenmiştir. Deprem ve tsunami felaketinden en büyük hasarı Fukuşima Dai-ichi Nükleer Santrali almıştır.

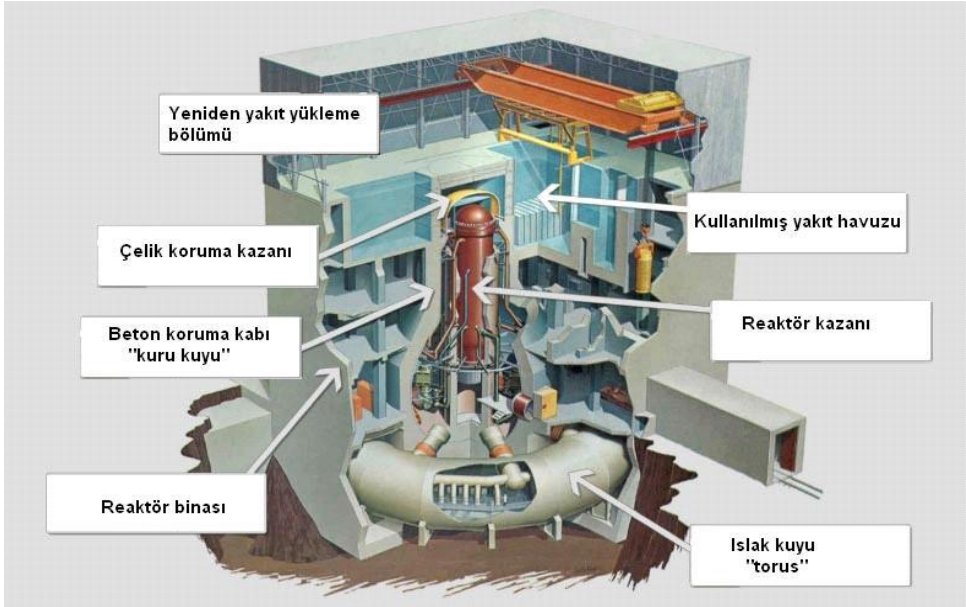
Deprem öncesinde Fukuşima Nükleer Santrali'nin 4., 5. ve 6. üniteleri kapalı durumdadır. İlk üç üniteye ise güç üretimi yapılmaktadır. Deprem ile birlikte bu üç ünitenin de doğru şekilde kapama durumuna geçtiği bilinmektedir. Ancak bozunma ısısının sistemden çekilmesi için soğutma işlemlerinin yürütüldüğü sırada, boyu 14-15 metreyi bulduğu tahmin edilen tsunamilerin Fukuşima nükleer sahasını da içeren Japonya'nın doğu kıyısını vurması sonucu soğutma işlemleri sekteye uğramıştır. Tsunami ile birlikte yedek güç ünitelerinin (dizel jeneratörlerin) kullanılamaması ile kaza bugün bildiğimiz halini almıştır.

Bu raporda kazanın aşamaları ve tahmini kaza hikayesi ile oluşan radyoaktif sızıntılar ve çevre ve insanlar üzerindeki etkileri irdelenecektir. Unutulmamalıdır ki, Japonya hükümeti dünya tarihinin en büyük beşinci depremi ve tsunani felaketi ile mücadele ederken, işleticinin etkin rol aldığı müdahale planı uygulanarak halkın ve çevrenin olası radyoaktif sızıntılardan asgari şekilde etkilenmesi için azami gayretle çalışmıştır. Gösterdikleri şeffaf

ve halk sağlığı ve güvenliğini birinci sırada tutan kaza yönetimleri ile tüm dünyaya örnek bir tavır sergilemişlerdir.

2. Fukuşima Nükleer Santrali Kaynamalı Su Reaktörleri (BWR)

Fukuşima reaktörleri General Elektrik (GE) Firması'nın 1960'ların başlarında tasarımı GE, Toshiba ve Hitachi gibi firmalarca tamamlanmış ikincil koruma kabı tipi "MARK-I" olarak bilinen kaynamalı su reaktörleridir. MARK I tipi koruma kabına sahip reaktör yapısı Şekil-1'de verilmektedir.

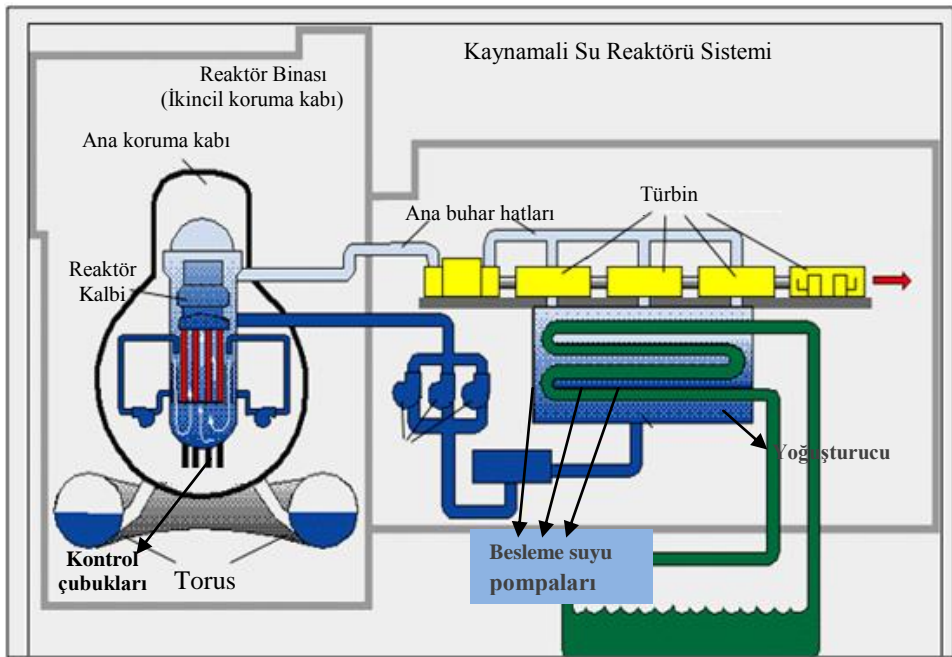


Şekil 1. Kaynamalı Su Reaktörü (BWR) ve Mark I tipi Koruma Kabı

Fukuşima santrali toplam 6 adet üniteden oluşmaktadır. Birinci, ikinci ve üçüncü üniteler 1971 ile 1975 yılları arasında devreye alınmıştır. Ünitelerdeki reaktör güç üretimi değişiklik göstermektedir. Birinci ünite güç üretimi 460 MWe, ikinci üniteden altıncı üniteye kadar 784 MWe ve altıncı ünite için 1100 MWe'dir. Yakıt demetlerinin boyu yaklaşık 4 m'dir. Birinci ünite 400, altıncı ünite 764 ve diğer ünitelerde 548 adet yakıt demeti yerleştirilmiştir. Her bir yakıt demetinde 60 adet yakıt çubuğu bulunur. Kullanılan yakıt uranyum dioksid olmakla beraber zarf malzemesi olarak zirkonyum alaşımı kullanılmıştır. Üçüncü ünite kısmen karışık oksit yakıt (mixed oxide fuel-MOX) yer almaktadır. Bu ünite toplamda 32 adet MOX yakıtlı yakıt demeti mevcuttur. Tüm üniteler normal çalışma şartlarında iken soğutucu suyunun

reaktör kalbinden çıkış sıcaklığı 286 °C ve çıkış basıncı 6930 kPa'dır. Koruma kabının soğutucu su döngüsü dışında kalan kısımlarındaki (kuru kısım) basınç ortalama 115-130 kPa civarındadır. Normal çalışma şartlarında, Japonya Nükleer ve Sanayi Güvenlik Kurumu'nun belirlediği güvenlik sınırları, reaktör basınç kapları için maksimum 8240 kPa ve 300 °C , reaktör koruma kabı için ise yaklaşık 500 kPa'dır. [2]

Mark I koruma kaplı BWR'da, ana koruma kabı 30 mm çelik destekli betondan yapılmış ampul şeklindeki kuru kuyu koruma kabıdır. Bu koruma kabı altındaki torus (simit) şeklindeki ıslak kuyuya bağlanmıştır. Bu ıslak kuyu yaklaşık 3000 m³ su içeren basınç rahatlatma havuzunu içermektedir [2]. Kuru kuyu koruma kabı ve ıslak kuyu ile birlikte ana koruma kabını oluşturur. Kuru kuyu koruma kabı reaktör basınç kabı (RPV)'yi içine alır. Basınç rahatlatma havuzu kaza anında enerjinin soğurulması görevini üstlenir. Kuru koruma kabındaki basıncın artması durumunda havuzdaki su basıncı düşürmek üzere kullanılır. Şekil-2'de sistemin geneli şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2. Kaynamalı Su Reaktörü'nün iç yapısı

Normal çalışma sırasında, kuru koruma kabı havası ve ıslak kuyu havası aktif olmayan nitrojen gazı ile doludur ve ıslak kuyu suyu açık hava basıncındadır. Rutin çalışmada suyun radyolitik bozunması sonucu küçük bir miktar hidrojen

oluşmaktadır. Bu durum koruma kabında bulunan yeniden birleşme elemanları ile kontrol altında tutulur. Ancak bu elemanlar zarf malzemesi olan zirkonyumun paslanması sonucu ortaya çıkabilecek hidrojen ile başa çıkmakta yeterli değildir.

Soğutucu kaybı kazası durumunda, kuru koruma kabında biriken buhar havalandırma hatlarından geçerek borular vasıtasıyla basınç rahatlatma havuzlarına bırakılır. Burada buhar yoğunlaştırılır. Buhar ayrıca reaktör basınç kabından güvenlik blöf vanaları ile tahliye edilerek direkt olarak borularla basınç rahatlatma havuzuna gönderilir. Bu havuzlarda buhar yoğunlaştırılabilir ancak buhar ile beraber havuza gelmiş olan yoğunlaşmaz gazlar havuzda basıncın artmasına sebep olabilir. Bu durumda havuzdaki suyun ısınmaması ve basıncın düşürülmesi için dışarıdan havuza soğutucu ilavesi yapılabilir. Bu ilave ilgili acil durum sistemleri ile sağlanır. Fazla basınç ise reaktör binasına (ikincil koruma kabına) bırakılabilir. Eğer yakıtta hasar varsa, salınan gazlar kripton, xenon, iyot ve selyum olabilir. İkincil koruma kabı acil durum kalp soğutma sistemlerini ve kullanılmış yakıt havuzlarını içine alır. Yüksek basınca dayanıklı olarak tasarlanmamıştır.

Ana soğutma döngüsü buharı reaktör basınç kabı içerisinde yer alan reaktör kalbinin üstünden alır ve türbine götürür. Türbin ikincil koruma kabı olan reaktör binasının dışında ayrı bir binada içerisindedir. Türbinden geçen buhar güçlü buhar pompaları yardımı ile yoğunlaştırılır ve su basınç kabına döner. İki adet güçlü döngü pompası da suyun reaktör kalbinin altından alınarak kalp etrafından tekrar geçirilmesi için kullanılmaktadır. Reaktör kapatıldığında, ana sistemdeki buhar bypass hatları ile direkt olarak yoğunlaştırıcılara gönderilir. Basınç 450 kPa'nın altına düşene kadar buhar türbini pompaları çalıştırmaya devam eder ancak yoğunlaştırıcıya denizden su çeken pompalar elektrikle çalışır ve bu pompalar için elektrik kaybına karşı dizel jeneratörlerle yedekleme yapılmıştır.

Kapanma (shutdown) modunda, basınç düştüğünde ikincil soğutma döngüsünde yer alan atık ısı uzaklaştırma (RHR) sistemi devreye girer. Bu sistem döngü pompalarının döngüleriyle bağlantılıdır. RHR sistemi daha küçük elektrikli pompalar ile çalışır ve suyu basınç kabından alır RHR sisteminin kendi ısı değiştiricilerine gönderir. Burada soğutulan su, denize bırakılır. Bu sistemin tamamı dizel jeneratörlerle desteklenmektedir. Birinci üniteye pasif kalp soğutması için izolasyon yoğunlaştırıcısı vardır. Reaktörden çıkan buhar harici bir yoğunlaştırıcıya gider. Çalışması için sadece DC güç ihtiyacı vardır. İkinci, üçüncü, dördüncü ve beşinci ünitelerde, reaktör basınç kabına su ilavesi sağlamak üzere otomatik olarak devreye girebilen Reaktör Kalbi İzolasyon Soğutması (RCIC) sistemi mevcuttur. Bu sistem, reaktör kapatıldıktan sonra gerçekleşmeye devam eden bozunmalar sonucu sistemde

hala devam eden ısı (bozunma ısısı) üretimi ile oluşan buhar ile çalışan küçük bir buhar türbini vasıtasıyla çalışır. Yoğuşturucu su deposundan alınan veya basınç rahatlatma havuzundan alınan suyu reaktör kalbine ilave etmek için kullanılmaktadır ve DC batarya sistemiyle kontrol edilir. Bu sistem ikinci ve üçüncü ünitelerin soğutulmasında basınç rahatlatma havuzundaki su kaynağına kadar çok yardımcı bir rol oynamıştır. Havuzlardaki suların kaynaması, üçüncü ünite 12 Mart 2011 tarihinde yerel saatle 11.00'da ve ikinci ünite 14 Mart 2011 yerel saatle 14.00'da gerçekleşmiştir [3].

Bunlara ek olarak Acil Durum Kalp Soğutma Sistemi (ECCS) soğutucu kaybı kazalarında acil müdahale için BWR'da mevcut olan bir sistemdir. Hem yüksek basınç hem alçak basınç sistemlerine sahiptir. Yüksek basınç soğutucu ilave (HPCI) sistemi birinci, ikinci ve üçüncü ünitelerin HPCI pompaları geniş basınç aralığında çalışabilen buhar türbinlerinden güç almaktadır. HPCI, soğutma için basınç rahatlatma çemberinden (suppression chamber) ve su depolama tanklarından aldığı suyu kullanır ve sadece DC güce ihtiyaç duyar. Basınç 700kPa'nın altına düştüğünde düşük basınç soğutucu ilave (LPCI) sistemi devreye girer. Bu sistem, RHR sistemi üzerinden çalışır ama RHR'a ek olarak basınç rahatlatma havuzunun suyunu ve kalp sprey sistemini de kullanır, tüm bu sistemler çalışmak için elektriğe ihtiyaç duyar. Tüm ECCS alt sistemleri devreye girmek için bir miktar güce ihtiyaç duyar. Bu sebeple, jeneratörlere destek olarak acil durum anında kullanılacak bataryalara ihtiyaç vardır.

Bu sistemlere ek olarak TEPCO, 1990 yılında ciddi kaza yönetimi (severe accident management- SAM) kuralları gereği yangın söndürme sisteminden RHR sistemine (jet-pompalara) destek sağlamıştır. İkinci dördüncü ve altıncı ünitelere, hava soğutmalı dizel jeneratörler yerleştirilmiştir. [2]

Fukuşima reaktörlerinin kontrol odalarında analog cihazlar vardır ve çoğu ölçüm skalasının dışındadır. Bu sebeple hem pek çok ölçüm alınamamış hem de verilere hızlı erişim imkanı dolayısıyla hızlı müdahale imkanı ortadan kalkmıştır.

3. Fukuşima Nükleer Santral Kazası

- Riechter ölçeğinde 8.9 büyüklüğündeki depremin ardından gelen tsunami ile Fukuşima Nükleer Santralinde bulunan hafif su kaynar su tipi reaktörlerden üçüne güç sağlayan sistemler devre dışı kalmıştır. Santralde altı adet nükleer reaktör bulunmaktadır. 1,2 ve 3. reaktörler otomatik olarak kapanmıştır. Deprem sırasında 4. ünite de yakıt

bulunmamaktadır ve 5. ve 6. üniteler rutin bakım sebebiyle soğuk kapama durumundadır.

- Kaza kullanılmış yakıt depolama havuzlarındaki suyun kaybedilmesi ve metal su reaksiyonu nedeniyle hidrojen oluşumu ve hidrojen gazı birikiminin % 4'den fazla olması nedeniyle meydana gelen patlama nedeniyle radyoaktif maddelerin çevreye salınımıyla daha kötü bir hal almıştır.
- Radyoaktif salınımlarının yüksek seviyelere ulaşması sebebiyle bu kaza INES ölçeğinde 7 olarak sınıflandırılmıştır.
- Ünite 1, 2 ve 3 şu an durağandır ancak halen tam olarak soğuk kapama koşullarına ulaşamamıştır.

11 Mart 2011'de yerel saat ile saat 14.46'da Tohoku-Chihou-Taiheiyo-Oki'de 8.9 büyüklüğünde bir deprem meydana gelmiş ve bölgede ciddi hasara sebep olmuş ancak depremden yaklaşık bir saat sonra oluşan tsunami çok daha büyük hasarlara yol açmıştır.

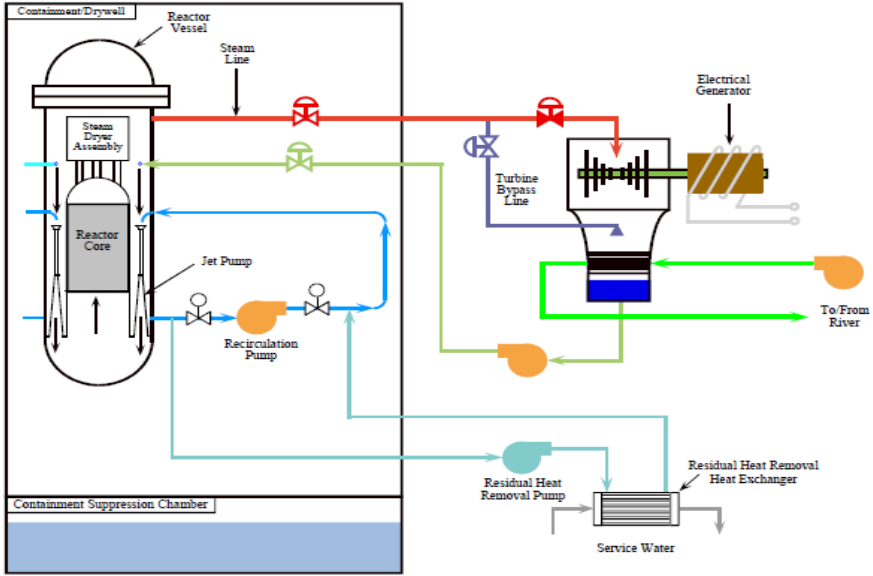
Deprem ile birlikte bölgede yer alan 4 ayrı nükleer santralde bulunan ve çalışmakta olan toplam 11 adet reaktör otomatik olarak kapanmıştır. Depremin hemen ardından Fukuşıma Nükleer Santrali'nin 1,2 ve 3. ünitelerinde sorunlar yaşanmaya başlanmıştır, depremden beş gün sonra ise 4. ünite de bazı sorunlar baş göstermiştir.

11 reaktörden 8'i şebeke ve yedek jeneratörleri ile atık ısı uzaklaştırma (RHR) sistemlerinin pompalarını çalıştırabilmiş ve dört gün içinde soğuk kapama (cold shutdown) durumuna ulaşmıştır. Kalan üç reaktörde ise depremden yaklaşık bir saat sonra reaktör soğutucu sistemi ve su çevirimi için gerekli güç kesilmiştir. Haftalar boyunca müdahaleler reaktörlerin aktif olarak soğutulması ve kullanılmış yakıt depolama havuzlarındaki artan sıcaklığın kontrol edilmesi üzerine odaklanmıştır. [2]

11 Mart 2011 tarihinden sonra değişik büyüklüklerde yaklaşık 1500 artçı deprem olmuştur. Ancak reaktörlere herhangi bir hasar vermemiştir. Ayrıca 11 Nisan'da gerçekleşen 7.1 şiddetindeki deprem ve 12 Nisan'da gerçekleşen 6.3 şiddetindeki depremler de bölgedeki reaktörlerde yeni hasarlara yol açmamıştır.

Japonya'daki nükleer santraller deprem anında çabuk tepki verebilmek üzere tasarlanmıştır. Yer hareketleri olması durumunda sistemi güvenle kapatabilmek için devreye giren otomatik sistemler mevcuttur. Yer hareketlerinin tasarım değeri Dai-ichi Nükleer Santrali için maksimum 550 Gal (0.56g)'dir. Dai-ichi Nükleer Santali için tasarımda belirlenen tsunami yüksekliği ise 5.7 metredir. Bu santralin deniz seviyesinden yüksekliği ise 10

metredir. [2] Bu felakette 14-15 m ve daha büyük tsunamiler gerçekleşmiştir. Deprem ile beraber yer hareketleri 500Gal'e ulaştığı için reaktörler otomatik olarak kapanmıştır. Reaktörlerin otomatik kapanmasının ardından yardımcı atık ısı uzaklaştırma (RHR) soğutma sistemi devreye girmiştir (bknz. Şekil 3). RHR sistemi elektrikle çalışan pompalar ile çalıştırılır. Reaktörlerdeki ana güç deprem sebebiyle kaybedilince türbin binasında bulunan acil durum dizel jeneratörleri devreye girmiştir ve 56 dakika boyunca çalışmıştır ancak depremden 56 dakika sonra gelen tsunaminin ardından su basması ile hasara uğramıştır. Mobil güç kaynakları santrale ulaştırılmış ve dokuz saat içinde santrale bağlanmıştır. Bu kaynakların kapasitesi ana santral dizel sisteminden çok daha düşüktür.

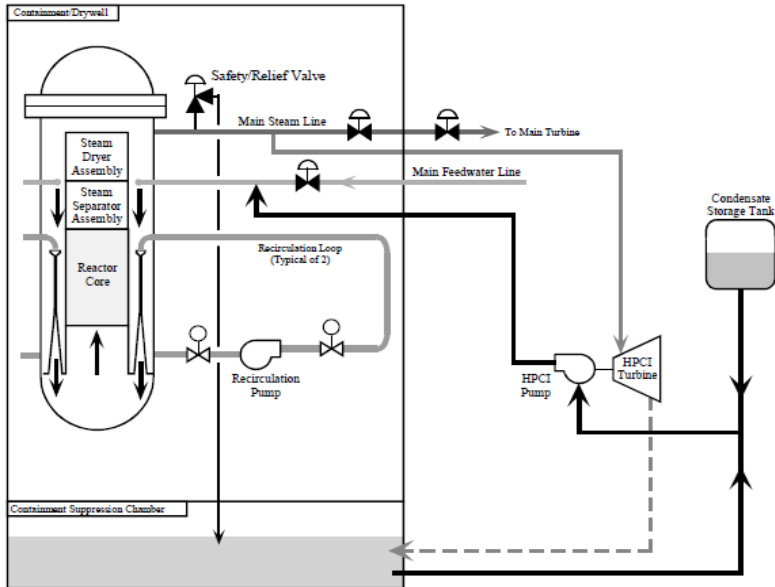


Şekil 3. Atık Isı Uzaklaştırma Sistemi (RHR)

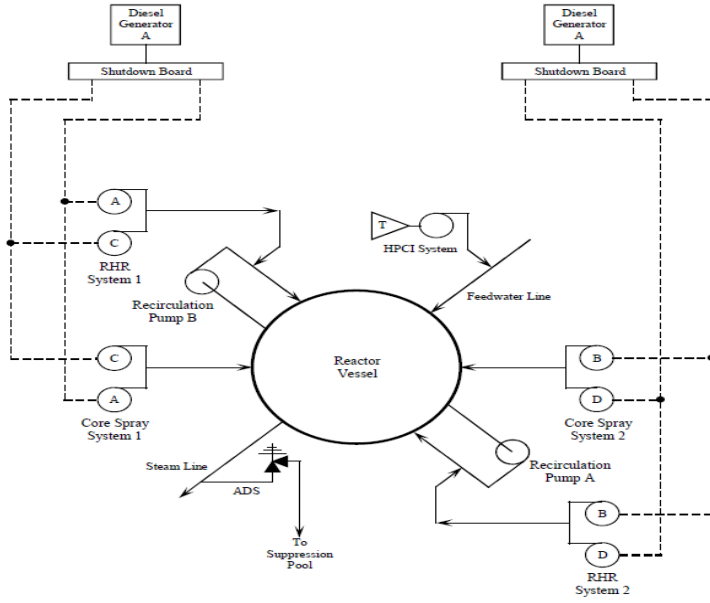
Kazanın ilk saati ve devamı günlerde ilk üç ünite yakıtta erime olduğu düşünülmektedir. TEPCO tarafından yakıtın % 75' nin eridiği ve reaktörün daha alt bölümlerine sızdığı tahmin edilmektedir [2]. Bu durum yakıt sıcaklığı 2500 °C'ye ulaştığında gerçekleşebilir. Erime durumu gerçekleştiğinde "corium" (eriyik zarf malzemesi, yakıt ve çelik karışımı) reaktör kabının alt kısımlarına doğru hareket etmeye başlar. Eğer çok sıcak haldeki yakıt yada zarf malzemesi soğutucu su ile temas ederse çözülüp kırılarak reaktör kabının alt kısımlarına doğru hareket edebilir. 1200 °C'de zarf malzemesinde çatlaklar

oluşur, 1300 °C’de oksitlenme başlar ve yaklaşık 1850 °C’de zarf erimeye başlar.

Reaktörlerin depremle beraber otomatik olarak kapanmasının ardından 1 saat sonra tsunami sebebiyle gücün kesildiği sırada reaktörler tahminen nominal güç üretimlerinin yüzde bir buçuğu (%1.5) kadar güç üretmeye devam etmekteydi. Bu üretim fisyon ürünleri bozunumundan (fission product decay) kaynaklanmaktadır. Doğrulamaları en iyi şekilde yapılmış modellerle yapılan hesaplamalar göstermiştir ki bu anda 1. ünite yaklaşık 22 MW, 2. ve 3. ünitelerde 33 MW güç üretimi vardır [2]. Su dolaşımı ile ısı çekilemediği için kalbe ev sahipliği yapan reaktör basınç kabında çok miktarda buhar üretilmesine sebep olmuştur. Bu oluşan buhar reaktörün altında bulunan basınç rahatlatma havuzunda (suppression pool) yoğunlaştırılabilir. Ancak buharın ıç sıcaklığı ve basıncı hızla artmıştır. Saat 16.36 sularında Acil Kalp Soğutma Sistemi (ECCS) ile su enjeksiyonu yapılmaya çalışılsa da sistemdeki güç kaybının görülmesinden yarım saat sonra birinci ve ikinci ünitelerde ECCS devreye girememiştir. Fukuşima Nükleer Santrali’nin Acil Kalp Soğutma Sistemi iki adet yüksek basınç sistemi ve iki adet alçak basınç sisteminden oluşur. Yüksek basınç sistemleri, yüksek basınçlı soğutucu enjeksiyon sistemi ve basınç düşürme sistemidir (bknz. Şekil 4 ve Şekil 5).

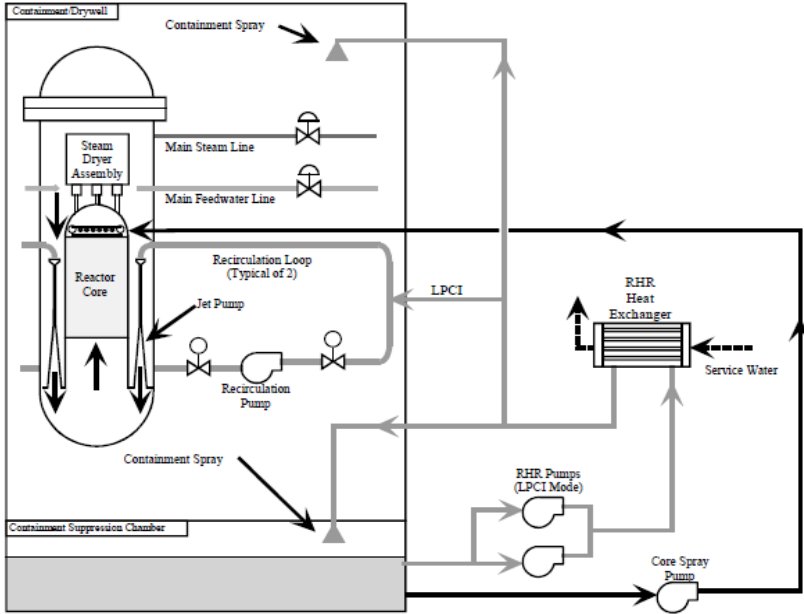


Şekil 4. Yüksek Basınçlı Soğutucu Enjeksiyon Sistemi (HPCI)



Şekil 5. Basınç Düşürme Sistemi ve ECCS Ağı

Alçak basınç sistemleri, alçak basınç soğutma sistemi ve kalp sprey sisteminden oluşur (bknz. Şekil. 6).



Şekil 6. Alçak Basınç Soğutucu Enjeksiyon Sistemi (LPCI)

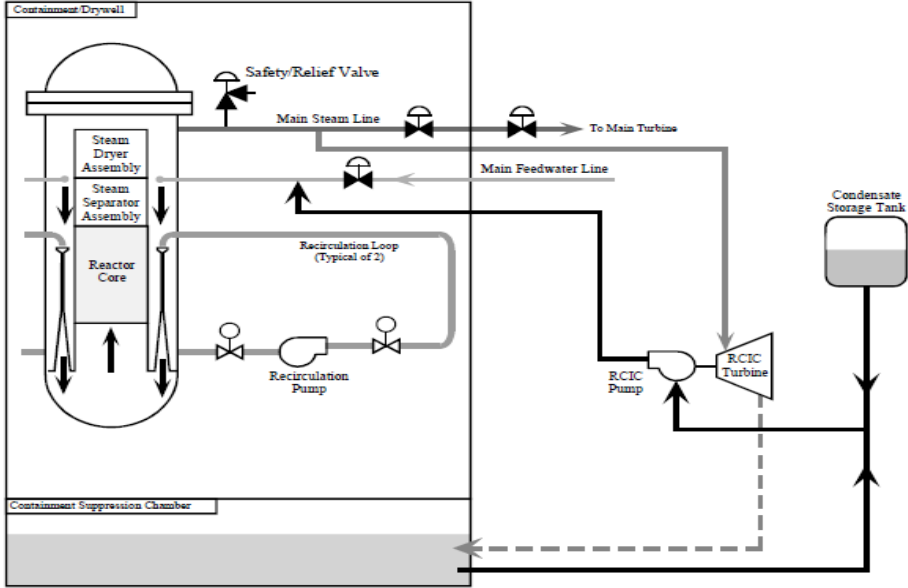
Saat 19.03 sularında Nükleer Acil durum duyuruldu ve 20.50'de Fukuşima bölgesinde santral çevresinde 2 km hattının içindeki halk için tahliye emri çıkarıldı. Tahliye hattı önce saat 21.23'de 3 km'ye ve 12 Mart 2011 saat 5.44'de 10km'ye çıkarıldı. Sonrasında 18.25'de tahliye hattı 20km'ye çıkarılmıştır [2].

İlk 12 saatten sonra ikincil koruma kapları içerisindeki basınç hızla artmış ve 12 Mart 2011'de tasarım değerinin 2 katına ulaşmıştır. Bu pompaların sızdırmazlıklarına zarar vermiş olabilir. 1. ünite de reaktör basınç kabındaki ana buhar hattının güvenlik rahatlatma vanası açılmıştır. 12 Mart sabahında 1. ünite de su seviyesi hızla düşmüştür. Reaktör basınç kabına harici pompalar yardımıyla deniz suyu basılmasından, su seviyesinin çok düşerek yakıtların kısmen açıkta kaldığı anlamı çıkarılabilir. Aynı zamanda düşük basınç soğutucu ekleme sistemi kullanılmıştır. 25 Mart'ta soğutma için deniz suyu yerine tatlı su kullanılmaya başlanmıştır. Kritikliği önlemek için suya yüksek oranda boron enjeksiyonu yapılmıştır.

Bu zaman aralığında, yakıtın çok sıcak hale gelmiş olan zarf malzemesinin buhar ve suyla olan teması neticesinde gerçekleşen reaksiyonlarla hidrojen oluşmaya başlamıştır. 12 Mart saat 15.36'da birinci ünitenin ikincil koruma kabında hidrojene bağlı bir patlama gerçekleşmiştir. Çatının çoğu havaya uçmuştur. 13 Mart Pazar günü birinci ünitenin ana koruma kabına deniz suyu enjeksiyonu başlamıştır. Patlamanın ardından basınç kabındaki basınç 500kPa'nın altına düşmüştür ve 300-500kPa arasında seyretmiştir. 6 Nisan 2011'de TEPCO hidrojen birikmesi şüpheleri üzerine ana koruma kabına nitrojen enjeksiyonuna başlamıştır. Şu an koruma kabı içerisinde basınç 195kPa civarında durağandır. [2]

İkinci ünite de, daha önce belirttiğimiz gibi 11 Mart'da ECCS in devreye alınması işlemi başarısız olmuştur. Ancak 14 Mart sabahına kadar reaktör kalbi izolasyon soğutması (RCIC) çalışmıştır (bknz. Şekil 7). İkincil koruma kabında basınç 13 ve 15 Mart'da ventilasyon sistemi ile kontrol edilmeye çalışılmış ve binanın tepesine yakın bir noktaya tahliye için bir pencere açılmıştır. 14 Mart Pazartesi günü RCIC devreden çıkmış ve reaktördeki su seviyesi hızlı bir düşüş yaşamıştır. 15 Mart'ta yangın söndürme hatlarından deniz suyu enjeksiyonuna başlanmıştır. Ancak reaktör basınç kabı (RPV) basıncı çok yükselmiştir. Basınç kabındaki kuru basınç 650 kPa'a ulaşmıştır (tasarım değeri maksimum 380kPa). 15 Mart Salı günü sabah saat 6.14 'de ikinci ünitenin supression çemberinde kırılma meydana gelmiş bir miktar radyasyon sızıntısına sebep olmuş ve kuru basıncı düşürmüştür. TEPCO saat 10.30'da ana koruma kabında hasar olabileceğini açıklamıştır. 17 Mart'tan itibaren RPV basıncı atmosferik basınca eşittir ve kuru kısım basıncı yaklaşık 200kPa'dır. TEPCO 1 Nisan'da 2m derinlikteki kablo yuvasında kırık

olduğunu tespit etmiştir. Buradan yüksek oranda radyoaktif su kaçağı olmaktadır. Bu kırık 6 Nisan günü kapatılmıştır.[2]



Şekil 7. RCIC Sistemi

Üçüncü ünite, 12 Mart saat 11.00 itibariyle RCIC devre dışı kalmıştır. Su seviyesi hızlıca düşmüş ancak ECCS ile su enjeksiyonu da mümkün olmamıştır. Tatlı su enjeksiyonu başlamış ancak kısa süre sonra durmuş ve 25 Mart'a kadar deniz suyu enjeksiyonu devam etmiştir. Ventilasyon yapılmasına rağmen RPV basıncı hızla artmış ve sonuçta 11.01'de büyük bir hidrojen patlaması gerçekleşmiştir. Çatının hemen hepsini ve binanın bir kısmını harap etmiştir. RPV'de su seviyesi artıp azalma göstermeye başlamış ancak 14 Mart'ta günün ortalarında kalbin yarısını açıkta bırakacak seviyede sabitlenmiştir. 16 Mart Çarşamba günü binanın tepesinden duman ve/veya buhar çıkışı gözlenmiştir. Ana koruma kabında hasar olabileceği olasılığı sebebiyle operatörler ünite 3 ve 4'ün merkez kontrol odasından (iki ünite için ortak) saat 10.45 itibariyle ayrılmışlardır. Ancak 45 dakika sonra geri dönerek su enjeksiyonuna devam etmişlerdir. Basınç 320kPa değerine kadar çıkmıştır. 16 Mart'tan itibaren basınç kabı hasarından şüphelenilmiş ve binadan çıkan radyasyon seviyeleri göz önüne alındığında da kısmen doğrulanmıştır. 20 Marttan itibaren reaktör basıncı ve kuru kısım basıncı azalmış ve durağan kalmıştır. Bu sebeple TEPCO, RPV'nin ciddi boyutta hasara uğramadığına inanmaktadır. Mart sonunda iç basınç atmosferik

basıncın biraz üzerindedir ve 10 Nisan itibariyle suyun sıcaklığı kaynama sıcaklığının altındadır [2].

Fransız Radyolojik Koruma ve Nükleer Güvenlik Enstitüsü (IRSN) tarafından yapılan hesaplamalara göre yaklaşık üç hafta sonra reaktör kalplerindeki yakıttan kaynaklı ısı, ünite bir için 2.5MW ve ünite 2 ve 3 için 4.2 MW'dır. Bu değerler günde sırasıyla 95 ve 160 ton su kaynatmaya yeterlidir. 30 Mart'dan itibaren reaktörlerin her birine saatte 7-8m³ su enjekte edilmektedir. TEPCO'nun açıklamasına göre ünite 1'in yakıtlarının %70'i ünite 2'nin yakıtlarının üçte biri hasar görmüştür. Hesaplamalara göre 2. ünitenin reaktör kalbi birkaç saat, birinci ünitenin reaktör kalbi ise 27 saat tamamen kuru kalmıştır ve hasarlar bu dönemde gerçekleşmiştir. İkinci ve üçüncü ünitelerin ana koruma kaplarında hasar olduğu düşünülürken birinci ve dördüncü ana koruma kapları bütünlüğünü korumaktadır. 22 Mart'ta bütün ünitelere şebekeden AC güç verilmiştir. Böylece daha efektif ölçme ve izleme yapılabilmektedir. TEPCO'nun açıklamasına göre kontrol odaları operasyona alınabildiğinde reaktörlerdeki su seviyeleri ve kullanılan yakıt havuzlarının sıcaklıkları sürekli izlenebilir ve müdahale edilebilir. Ancak deniz suyu sebebiyle bazı pompalar hasar görmüştür ve halen içerideki yüksek radyasyon seviyeleri sebebiyle içeriye girip müdahale edilememektedir. Bu sebeple reaktörlerdeki radyoaktif suyun tahliyesi sağlanarak radyasyon seviyesinin düşürülmesi birinci öncelik halini almıştır.

4. Fukuşima Nükleer Santrali Reaktörlerinin Son Durum Özetleri

Santralin birinci reaktöründe sürekli soğutmanın sağlanması için artırılmış su sağlama sistemi çalışır hale getirilmiş ve güç temin edilmiştir. Reaktör su ilave sistemi ile reaktörde soğutma çalışmaları sürdürülmektedir. Eylül ayı itibari ile soğutma suyu ilavesi yaklaşık saatte 3.6 m³ debi ile devam etmektedir. Bu sistem ile Ağustos ve Eylül ayları arasındaki dönemde reaktör basınç kabı altında ölçülen değerlerle soğutma suyunun sıcaklığındaki artışın 100⁰C'nin altında kaldığı görülmüştür [4]. Reaktör basınç kabında suda gerçekleşen sıcaklık artışı 100⁰C'nin sürekli olarak altında olması soğuk kapama durumuna yaklaşıldığının en önemli göstergesidir. 7 Nisan itibariyle başlanan ana koruma kabına Nitrojen gazı enjeksiyonu halen devam etmektedir.

Santralin ikinci ünitesi de birinci ünite için anlatılan şekilde sürekli soğutulmaktadır. Eylül ayı itibari ile soğutma suyu ilavesi yaklaşık saatte 3.8 m³ debi ile devam etmektedir. Ağustos-Eylül ayı süresince soğutma suyu giriş çıkış sıcaklık artışı sürekli olarak 130⁰C'nin altında kalmıştır [4]. 28 Haziran itibariyle başlanan ana koruma kabına Nitrojen gazı enjeksiyonu halen devam etmektedir.

Santralin üçüncü ünitesi de ilk iki ünite de kullanılan sistemle sürekli soğutulmaktadır. Eylül ayı itibari ile soğutma suyu ilavesi yaklaşık saatte 7.0 m³ debi ile devam etmektedir. Ağustos-Eylül ayı süresince soğutma suyu giriş çıkış sıcaklık artışı sürekli olarak 120⁰C'nin altında kalmıştır. [4] Bu ünite de ana koruma kabına Nitrojen gazı enjeksiyon işlemine 14 Temmuz'da başlanmıştır ve halen devam edilmektedir.

Her üç ünite de de verimli şekilde soğutma yapılmaktadır. Bunun sonucu olarak Ekim ayı ortalarından itibaren soğutucu suyu sıcaklık artış değerleri 100⁰C'nin altında kalmıştır. Bu üç ünite de de soğuk kapama durumuna yaklaşıldığına işaret etmektedir.

Daha önce belirtildiği santralin dördüncü ünitesi deprem esnasında rutin denetleme geçirmekte olduğundan reaktörde yakıt bulunmamaktadır. Yakıtlar reaktör kalbinden çıkarılarak kullanılmış yakıt depolama havuzlarında bekletilmektedir. Aynı şekilde santralin beşinci ve altıncı üniteleri deprem esnasında soğuk kapama durumundadır. Bu üç ünite de kullanılan yakıt depolama havuzlarının sürekli soğutulması sağlanmaktadır.

Santralin tüm üniteleri için analizler yapılarak reaktör binaları için sismik güvenlik testleri yapılmaktadır. Analizler sonucu altı ünitenin de binalarına sismik hareketler için güçlendirme yapılmasına gerek olmadığı görülmüştür. Ancak dördüncü ünitenin kullanılmış yakıt depolama havuzu için ilave önlemler alınmaktadır. Henüz havuzun detaylı incelemesi mümkün değildir. Şu an havuzda sadece kullanılmış yakıtlar değil denetleme sırasında kalpten çıkarılmış tüm yakıt çubukları bulunmaktadır. TEPCO doz hızları düşük olduğu süre boyunca havuzun altında güçlendirme çalışması yaparak güvenlik marjini arttırmaya çalışmaktadır.

5. Kazanın INES Ölçeği ile Derecelendirilmesi

Fukuşima Nükleer Santralinde devam eden radyolojik salınımlar sebebiyle Japon yetkililer kazanın derecesini 7. Seviyeye yükselme kararı almıştır [5]. Uluslararası Nükleer ve Radyolojik Olay Ölçeği (International Nuclear and Radiological Event Scale - INES) ölçeklendirmesi aşağıdaki Şekil 8'de görülebilir.



Şekil 8. INES Ölçeklendirme Sistemi

Tsunami felaketinden sonra Fukuşima Nükleer Santrallerinde INES ölçeğine göre sekiz farklı olay kaydedilmiştir. [3]

1. Seviye 3: Nükleer Santrallerdeki genel durum
2. Seviye 5: Soğutma sisteminin fonksiyonlarının kısmen kaybedilmesi (2 reaktörde)
3. Seviye 5: Radyolojik salınım
4. Seviye 3: Kullanılmış yakıt depose soğutmasının kaybedilmesi
5. Seviye 3: Reaktör soğutma sisteminin kaybedilmesi (3 reaktörde)

Japon yetkililer yaptıkları açıklamada salınan toplam Iyot-131'in yaklaşık olarak 1.3×10^{17} Bequerel'e, Sezyum-137'nin ise 6.1×10^{15} Bequerel'e ulaştığının tahmin edildiğini belirtmiştir [3]. Bu sebeple Nükleer ve Endüstriyel Güvenlik Kurumu (NISA) kazanın seviyesinin 7 seviyeye yükseltilmesini uygun görmüştür. 1986 Çernobil kazasıyla aynı seviyeye çıkmış olmasına karşın, bu kazanın halk sağlığı açısından sonuçları Çernobil ile kıyaslanamayacak kadar düşüktür. Japon yetkililer kazanın ilk anından itibaren uluslararası alanda son derece şeffaf bir protokol yürütmüş ve halk sağlığını korumak için hızlı şekilde çevre halkını tahliye ederek radyolojik sonuçları en aza indirmek için hızla önlem almıştır. Çevre halkı önce 10km'lik çember dışına tahliye edilirken ardından 20km'lik sınırın dışına taşınmıştır. Su, süt ve pek çok gıda ürünü kazanın ilk günlerinden bu yana rutin olarak

incelenmekte ve tüketimleri kontrol altında tutulmaktadır. Kararlı potasyum-iyot tabletleri önlem olarak dağıtılmıştır.

FUKUŞİMA ve ÇERNOBİL [5]



Tablo 1. Fukuşİma ve Çernobil Kazalarının Karşılaştırılması

	Fukuşİma Daiichi	Çernobil
Kazanın olduğu tarih	11 Mart 2011	26 Nisan 1986
Kazanın detayları	Richter ölçeğinde 8.9 şiddetinde bir deprem ve ardından gelen tsunami, santralin elektrikle çalışan sistemlerine zarar vererek soğutma sistemlerinin çökmesine sebep oldu. Bu olayları hidrojen gazına bağlı patlamalar izledi.	Bir sistem testi sırasında gerçekleşen ani güç dalgalanması, reaktör basınç kabının zarar görmesine ve bir dizi patlamaya neden oldu. Meydana gelen şiddetli yangın 10 gün devam etti.
INES seviyesi	7. Seviye – Önemli kaza	7. Seviye – Önemli kaza
Reaktör sayısı	Santralde altı adet reaktör bulunmaktadır fakat sadece üç tane reaktör ve kullanılmış yakıt saklama havuzları endişe uyandırmaktadır.	Santralde dört adet reaktör bulunmaktaydı fakat kaza sadece bir reaktörde meydana geldi.

Reaktör tipi	Kaynamalı su reaktörü (BWR). Japon yetkililer, Çernobil kazasında gerçekleşenin aksine, ana koruma kabının Fukuşima kazasında halen bütünlüğünü koruduğunu vurgulamakta. Bununla beraber, Fukuşima santralinde Çernobil'de bulunan yanıcı grafit moderatörlü reaktör kalbi bulunmamaktadır.	Grafit moderatörlü kaynamalı su reaktörü. Ayrıca reaktörün ana koruma kabı bulunmamaktadır ve radyasyonun havaya salınımını engelleyecek herhangi bir sistem bulunmamaktadır.
Radyasyon salınımı	Yaklaşık değerler [4] Iyot-131 izotopu için 200 P*Bq Sezyum-137 izotopu için 20 PBq *P; Peta ($\times 10^{15}$)	Yaklaşık değerler [6] Iyot-131 izotopu için 1760 PBq Sezyum-137 izotopu için 85 PBq
Etkilenen Alan	Yetkililer santralin kuzeybatısında 60 km den daha uzakta, güney-güneybatısında yaklaşık 40 km uzakta radyasyon seviyesinin izin verilen değerlerin üstünde olduğunu bildirdiler.	Birleşmiş Milletler yetkililerinin bildirisine göre, radyasyon kirliliği santralden 500 km uzağa ulaşmıştır. Fakat, daha uzakta bulunan hayvanlar ve bitkiler de etkilenmişlerdir.
Tahliye edilen bölge	20 km; 20-30 km gönüllü tahliye bölgesi (Halkın kendi isteğiyle boşalttığı bölge). Bununla birlikte, tahliye bölgesinin dışında bulunan beş bölgede yaşayan halk da tahliye edildi.	30 km
Tahliye edilen insan sayısı	78.000 kişi tahliye edilmiştir.	1986 yılında, yöneticiler reaktör çevresinde yaşayan yaklaşık 115 bin insanı tahliye etmiştir ve akabinde 1986 yılı sonrası Belarus'tan, Rusya Federasyonu'ndan ve Ukrayna'dan yaklaşık 220 bin insan yerlerinden taşınmıştır.

Kazaya bağlı ölümler	Radyasyon kaynaklı ölüm görülmemiştir.	Birleşmiş milletler raporunda, 2008 yılı itibariyle radyasyon kaynaklı ölümlerin sayısının 64 olduğu yer almaktadır. Fakat gerçekte kaç kişinin öldüğü ile ilgili tartışmalar halen devam etmektedir.
Uzun vadeli sağlık sorunları	Tesislerde ve bölge genelinde radyoaktif salınım miktarları ve mevcut doz hızları dikkate alındığında insan sağlığı açısından risklerin düşük olduğu tahmin edilmektedir.	Belarus, Rusya Federasyonu ve Ukrayna vatandaşları arasında, 2005 yılına kadar kaza sırasında radyasyona maruz kalmış çocuklar ve yetişkinler arasında 6000'den fazla tiroid kanseri vakası olmuştur ve önümüzdeki bir kaç on yılda da yeni vakalar beklenebilir.
Güncel durum	Reaktörlerin tam soğutulmasına devam edilmektedir. Reaktörlerin soğuk kapama durumuna geçirilmesi için etkili soğutma büyük ölçüde sağlanmaktadır. Herhangi bir radyoaktif sızıntıyı bertaraf etmek amacıyla reaktörlerin etrafına koruyucu binalar inşa edilmektedir.	Hasarlı reaktör betondan bir kaplama ile tamamen kaplanmıştır. Yeni koruma kabı inşaatı 2014 yılında tamamlanacaktır.

6. Çevreye Yayılan Radyoaktif Maddeler

Fukuşima nükleer kazasında olayların gelişimiyle birlikte reaktörlerin basınç kaplarındaki basıncı düşürmek için ventilasyon yapılmış, reaktör binalarında patlamalar gerçekleşmiş ve buna ek olarak lokal kaçaklar meydana gelerek çevreye radyasyon sızıntısı gerçekleşmiştir. Kazanın kontrol altına alınmasının ardından Mayıs ayı ortalarında TEPCO, ünitelerde çalışma ortamı yaratabilmek amacıyla dört adet filtreleme sistemi kullanarak üniteler

içerisindeki havayı çekmiştir. Aynı amaca uygun olarak 1. ünitenin kuzey kapısı kısmen açılmış ve bu şekilde de açık havaya radyasyon çıkışı gerçekleşmiştir. Bu salınımlar sebebiyle santal çevresindeki radyasyon ölçüm ve izleme sistemleri güçlendirilerek, hem saha içinde hem dışında ölçümler daha sık ve ayrıntılı şekilde alınmaya başlanmıştır.

Havadaki radyasyon miktarı sürekli olarak ölçülmektedir. Kazanın ilk günlerinde ölçümler gezici araçlar aracılığıyla sağlanmıştır. NISA tarafından yapılan hesaplamalara göre kazanın ilk dört gününde gerçekleşen toplam salınım miktarları yaklaşık Iyot-131 izotopu için 1.6×10^{17} Bq, Sezyum-134 izotopu için 1.5×10^{18} Bq ve Sezyum-137 izotopu için 1.5×10^{16} Bq olarak hesaplanmıştır [7]. Bugün kesin olmamakla beraber günümüze kadar gerçekleşen toplam radyoaktif madde salınımı Iyot-131 izotopu için yaklaşık 2×10^{17} Bq ve Sezyum-137 izotopu için 2×10^{16} Bq olduğu düşünülmektedir [4].

Kaza sonrasında kimi kaçaklar ve depolama ihtiyacı sebebiyle deniz suyuna da radyoaktif madde bulaşması gerçekleşmiştir. Reaktör basınç kaplarından geçen su da radyoaktif maddeler mevcuttur ve bu su ana koruma kabı içerisine sızmıştır. Ayrıca soğutma suyu olarak reaktörlere ve kullanılmış yakıt havuzlarına gönderilen su ana koruma kabının da dışına çıkarak reaktör binalarında (ikincil koruma kabı içinde) ve türbin binalarında birikmiştir. Bu radyoaktif olarak kirlenmiş suyun kontrolü hem reaktör binaları içerisinde çalışma ortamı yaratılması için önemli bir konu haline gelmiştir.

Binaların dışına alınan kirlenmiş suyun kontrolü de radyoaktif maddelerin çevreye yayılmaması için önemlidir. 2 Nisan 2011'de 2. üniteye elektrik kabloları için bırakılmış bir delikten su sızıntısı olduğu tespit edilmiştir ve ancak 6 Nisan'da su sızıntısı tamamen durdurulabilmiştir. Yapılan ölçümlerle kaçan suyun içerisindeki radyoaktivitenin 4.7×10^{15} Bq olduğu belirlenmiştir. 3. üniteye su girişinin sağlandığı bir kanalda de kaçak tespit edilmiş buradaki kaçan suyun radyoaktivitesinin de 2.0×10^{13} Bq olduğu yapılan ölçümlerle belirlenmiştir. Bunlara ek olarak ünitelerde biriken yüksek miktarda radyoaktif suyun tahliyesi ve depolanması için 5. ve 6. ünitelerin kullanılmış su depolama tanklarında bulunan ve düşük seviyede radyoaktif olan su tahliye edilmiştir. 10393 ton düşük radyoaktiviteye sahip su 4-10 Nisan 2011 tarihleri arasında tahliye edilerek denize verilmiştir. Tahliye edilen suyun radyoaktivitesi 1.5×10^{11} Bq olarak ölçülmüştür [7].

7. Kaza Sebebiyle Yaşanan Radyasyon Etkilenmeleri

Uluslararası Radyasyondan Korunma Komitesi (ICRP)'nin 103 no'lu en son tavsiyelerinde radyasyon görevlileri için planlı ışınlama durumlarında doz sınırı ardışık 5 yılın ortalaması olmak üzere yıllık 20 mSv'dir. Bir yılda maksimum 50 mSv'lik doz değerinin aşılmaması tavsiye edilmektedir. Kadın çalışanlar için, hamileliğin belirlenmesinden sonra, hamileliğin geri kalan döneminde embryo/ fetus için ilave doz sınırı 1 mSv dir. IAEA tarafından verilen rehber değerlere göre acil durumlarda bir radyasyon işçisinin alabileceği etkin doz 500 mSv'i aşmamalıdır.

Kazaya müdahale sırasında eğitimli elemana ihtiyaç olması ve kazanın sonuçlarının ağırlaşmaması için bu sınırlar artırılabilir.genişletilmiştir. Japon mevzuatına göre 100 mSv olan etkin doz sınırı250 mSv'e çıkarılmıştır. Kazadan Mayıs ayı sonuna dek yaklaşık 7800 çalışan santral sahasına girmiş ve ortalama olarak yaklaşık 7.7 mSv doz almışlardır. 30 çalışan 100mSv'in üzerinde doza maruz kalmıştır. 24 Mayıs günü iki işçi üçüncü ünitenin türbin binasının tabanındaki elektrik kablolarını kontrol için içeri girdiklerinde yerde birikmiş radyoaktif olarak kirli suya basmışlar ve ayakkabılarının ince tabanlı olması sebebiyle ayak tabanlarından radyasyona maruz kalmışlardır. Hemen doktor kontrolüne alınan işçilerin 2-3 Sv doz almışlardır. [7]

30 km'lik alan içerisinde çalışan erkek Japon güvenlik gücü personeli için alınabilecek toplam doz sınırı 250 mSv olarak belirlenmiştir. Haziran ayı itibariyle hiçbir personel bu sınırı aşmamıştır. 20 km'lik alan içerisinde çalışan itfaiye personeli, itfaiye personeli için hazırlanmış mevzuatta belirtilen acil durum doz sınırı olan 100 mSv'in altında doz almıştır. [4]

Fukuşima bölgesinde yaşayan ve reaktörlere uzaklığı 50 km'den az olan bölgelerde yaşayan vatandaşlara iyot tabletleri ve pudraları hazırlanmıştır. İhtiyaç olması halinde dağıtılmak üzere tabletler şehirlerdeki ve kasabalardaki ofislerde depolanmıştır. Ayrıca acil durumda bölgenin tahliye edilmesine yönelik farklı tahliye senaryoları da geliştirilmiştir. Bölge yöneticilerinin halkı bilgilendirmesi esnasında endişe ve korkuya sebep olmayacak şekilde açıklamalarda bulunmaları için gerekli eğitimler yapılmıştır.

Bölgede yaşayan halkın radyasyona maruz kalmaları göz önüne alındığında yaklaşık 200 bin vatandaşın neredeyse tamamı kontrolden geçirilmiştir. Vatandaşların büyük çoğunluğunun yasal sınırların üzerinde doz almadığı belirlenmiş, Fukuşima Tıp Fakültesi'nin çalışmaları sonucu insan sağlığını

olumsuz etkileyecek seviyede radyasyona maruz kalınmadığı ifade edilmiştir. 102 vatandaş yasal doz sınırının biraz üzerinde radyasyona maruz kalmış ancak dekontaminasyon uygulamaları ile radyasyonun zararlı etkilerinin oluşması engellenmiştir. 0-15 yaş arası 1080 çocukta yapılan ölçümler ile hiç bir çocuğun tiroid bezi için maruz kalınan doz saatte 0.2 μ Sv’i geçmemiştir. [7] (Bu değere eşdeğer olarak ICRP’nin 1 yaşında bir çocuk için belirlediği tiroid bezi eşdeğer doz limiti 100mSv’dir.) Aşağıdaki tabloda, Fukuşima Nükleer Santraline müdahale eden ekiplerde çalışan işçilerin aldıkları toplam dozlar özetlenmiştir.

Tablo 2. Çalışanlar için doz değerleri [4]

Doz (mSv)	Harici Doz Alan Çalışan Sayısı (Mart-Temmuz arası)			Harici (Mart-Temmuz arası) ve Dahili Doz (Mayıs ayına kadar) Alan Çalışan Sayısı		
	TEPCO çalışanları	Diğer çalışanlar	Toplam	TEPCO çalışanları	Diğer çalışanlar	Toplam
250’den fazla	0	0	0	6	0	6
200 – 150 arası	0	0	0	1	2	3
150 – 100 arası	6	3	9	12	3	15
100 – 50 arası	27	9	36	91	26	117
50 – 20 arası	174	169	343	262	269	531
50 – 20 arası	413	1049	1462	560	1250	1810
20 – 10 arası	613	1582	2195	532	1700	2232
10 veya daha az	2003	10585	12558	1772	10147	11919

TOPLAM (kişi)	3236	13397	16633	3236	13397	16633
Maksimum (mSv)	182.33	199.42	199.42	678.08	236.42	678.08
Ortalama (mSv)	13.20	6.80	8.03	19.50	8.00	10.30

Sahada çalışan işçilerin aldıkları doz için ölçüm yapacak olan kişisel dozimetler kaza anında her işçiye sağlanamamıştır. Eksik bireysel dozimetreler zaman içerisinde tamamlanmıştır. Ayrıca tsunaminin ardından saha içindeki pek çok ölçüm cihazı fonksiyonunu yitirmiş ve çevrede de yeterince verimli ölçüm yapılamamıştır. Şirket acil olarak radyasyon ölçüm araçlarını çeşitlendirme ve özellikle sahada çalışan işçiler için kişisel dozimetreler temin etme yollarını aramıştır. Kazanın ilk zamanlarında acil durum müdahaleleri sırasında iki işçi tiroid bezi eşdeğer doz limitinin üzerinde radyasyon almıştır.

8. Tokyo Elektrik Güç Şirketi'nin Fukuşima Eylem Planı

Kazanın ardından yerel halkın evlerinden uzaklaştırılmış olması ve çevrenin radyoaktif kirlenmesinden duyulan rahatsızlık sebebiyle TEPCO (Tokyo Elektrik Güç Şirketi) kazanın üzerinden bir ay geçtiğinde eylem planını hazırlamış ve hemen uygulamaya koymuştur. Birincil amaç reaktörlerin sürekli olarak soğutulmasının teminidir. Bu şekilde reaktörler kontrol altında tutularak hem güvenli şekilde soğutulmaları hem de olası radyoaktif sızıntıların önüne geçilmek istenmektedir. Kazanın ardından üç reaktörün soğuk kapama durumuna geçirilmesi ve kullanılmış atık havuzlarının güvenli şekilde soğutulmaya devam etmesi için gerekli tüm tedbirler alınmaya başlanmıştır.

Fukuşima nükleer santralinde yapılan çalışmalar ile ilk hedef evlerinden uzaklaştırılan vatandaşların evlerine geri dönebilmelerinin sağlanmasıdır. Reaktörlerin durumu yeterince güvenli hale gelene kadar bu vatandaşların evlerine dönüşlerine izin verilmemektedir. TEPCO bu amaçla hazırladığı eylem planında iki önemli noktaya yer vermiştir. İlk olarak radyasyon dozlarına sürekli olarak azalmanın gözlenmesidir. Sürekli yapılan ölçümlerle santral çevresindeki radyasyon dozları belirlenmektedir. İkinci olarak ise radyoaktif materyallerin herhangi bir yeni sızıntı olmaması için kontrol altında

tutulmasıdır ki böylece ölçülen doz giderek azalacaktır. Halkın güvenliğinin sağlanması için reaktörlerin ve dolayısıyla radyoaktif materyallerin güvenli faza geçişine kadar vatandaşların evlerine geri dönüşlerine izin verilmeyecektir. Bu durum şirketin tahmine göre 2011 yılı sonuna kadar devam edecektir. [8]

TEPCO kaza sonrasında izlenecek adımları üç başlık altında toplamıştır: Soğutma, radyoaktivitenin azaltılması, izleme ve arındırma. Bu üç adım da ayrıca beş alana ayrılmıştır:

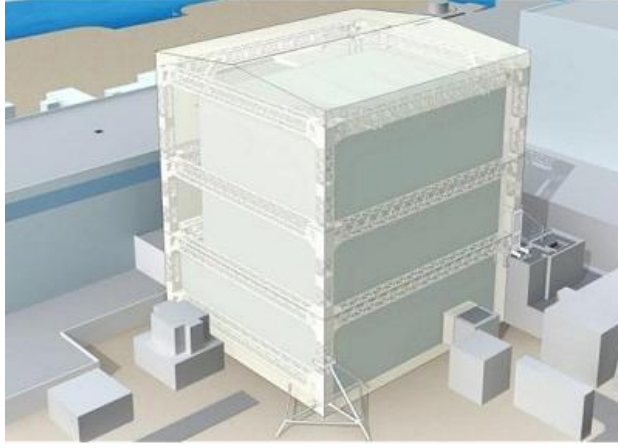
1. Reaktörlerin soğutulması
2. Kullanılmış yakıt havuzlarının soğutulması
3. Radyoaktif olarak kirlenmiş suyun toplanması, depolanması, işlenmesi ve yeniden kullanılması
4. Hava ve topraktaki radyoaktif maddelerin azaltılması
5. Boşaltılmış arazilerdeki radyasyon dozlarının ölçülmesi, düşürülmesi ve duyurulması

TEPCO, soğutmada kullanılarak radyoaktif olarak kirlenen suyu depolamak için pek çok depolama ünitesi yapmayı planlamıştır ve inşaatları Ağustos 2011 itibariyle tamamlanmıştır. Ayrıca ayrı bir binada kullanılmış suyun radyoaktivitesinin düşürülmesi için çalışmalar yürütülmesi planlanmış ve gerekli inşaat çalışmaları tamamlanarak faaliyete geçilmiştir. Aşağıdaki fotoğraflar Eylül 2011’de TEPCO tarafından yayınlanmış olup radyoaktif kirlenmenin giderilmesi için inşa edilmiş binaları göstermektedir.



Şekil 9. Fukuşima Santrali- Dekontaminasyon Binaları

Ünitelerin soğutma kanallarının tamiri için de ayrıca çalışılmıştır. Eylem planı içerisinde olmak üzere ünitelerin üzerlerinin tamamen kapatılması düşünülmektedir. (bkz. Şekil 10)



Şekil 10. Hasarlı ünitelerin etrafına yapılacak kaplama çalışmaları

Birinci ünite bu çalışmalar başlamış ve Eylül ayı itibariyle hız kazanmıştır. Binanın etrafına yapılacak olan kaplamalar için yapılacak çelik iskeletin inşaatı tamamlanmıştır. Aşağıdaki resimde şu ana kadar gelinen nokta görülebilir. Bu resimler 15 Eylül 2011’de Fukuşima Nükleer Santrali’nin birinci ünitesinde çekilmiştir. [TEPCO tarafından 17 Eylül 2011’de yayınlanmıştır]



Şekil 11. İnşaatı devam eden kaplama binası (1. ünitenin etrafında)

29 Eylül 2011’de Fukuşima Santrali’nin birinci, ikinci ve üçüncü ünitelerinde reaktör basınç kabının altındaki sıcaklık değerleri kazanın meydana geldiği 11 Mart 2011 tarihinden bu yana ilk kez 100°C ’nin altına düşmüştür [10]. Soğuk kapama durumu, radyoaktif bozunma sonucu oluşan ısının soğutucu ile etkin olarak soğutulması ve soğutucu suyun sıcaklığının hep 100°C ’nin (yaklaşık olarak suyun kaynama sıcaklığı) altında kalmasıdır. Sıcaklıkların 100°C ’nin

altına düşmüş olması güzel bir gelişme olmakla birlikte reaktör basınç kapları altlarındaki sıcaklık değerlerinin stabil olması soğuk kapama durumuna geçilmesi için henüz zamana ihtiyaç vardır. Üç ünite de reaktör kalpleri erimiş durumdadır. Bu sebeple soğuk kapama durumuna erişimle ilgili yeni yaklaşımlar yapılması gerekmektedir.

TEPCO, Fukuşima eylem planında ikinci aşama soğuk kapama durumuna erişilmesidir. Eylem planına göre hedeflenen soğuk kapama durumuna en geç 2011 yılı sonlarında erişilmesidir. Soğuk kapamanın ardından, reaktör binaları tamamen kaplanacak, radyoaktif olarak kirlenmiş toprak temizlenecek ve ardından nükleer yakıtlar reaktörlerden taşınacaktır. [9]

9. Kazadan Çıkarılan Dersler

Teknolojinin her alanına bakıldığında kazalardan çıkarılan derslerin teknolojinin gözden geçirilerek ilerlemesinde ve geliştirilmesinde çok büyük önem arz ettiği görülür. İnsanoğlu geliştirdiği tüm teknolojilerin sonuçlarından ve teknoloji kullanılırken meydana gelen kazalardan çıkarımlar yaparak iyileştirme ve geliştirme çalışmaları yürütmüştür. Hangi teknoloji olursa olsun güvenlik kültürünün yerleşmiş olması çok önemlidir. Teknolojinin her alanında yapılan çalışmalarda güvenlik kültürüne uygun hareket etmek, gerek insanların can güvenliği gerekse teknolojinin sürdürülebilirliği açısından büyük önem taşır. Nükleer teknoloji ve nükleer santrallerin tarihsel gelişimi göz önüne alındığında yaşanan kazalar teknolojide büyük değişikliklere sebep olmuş ve nükleer santral teknolojisini güvenlik kültürünün her aşamada en iyi hayat bulduğu sektörlerden biri haline getirmiştir. Santralin tasarımı, kurulumu ve işletiminden yakıt üretimi ve atıkların işlenmesine kadar tüm adımlarda halk sağlığı ve güvenliğini ilk sıraya almak üzere yerleşik bir güvenlik kültürü mevcuttur.

Güvenlik önlemlerinin geliştirilmesi ve tasarımların derinliğine güvenlik anlayışı içinde gelişme göstermesi için kazalardan çıkarılan dersler oldukça büyük önem taşır. Gerçekleşen kazaların detaylı olarak incelenmesi ve ne olduğunun tam olarak anlaşılması için detaylı analizler kazanın gerçekleştiği günlerden itibaren gerek ticari şirketler, gerek üniversiteler gerekse araştırma laboratuvarları tarafından titizlikle yapılmaktadır. Şu ana kadar elde edilen veriler ile bu kazadan çıkarılacak derslere yönelik çalışmalar ve olası çözüm önerilerine yönelik çalışmalar hızla sürdürülmektedir.

Bu kazadan çıkarılacak dersler düşünüldüğünde, yeni tasarımlarda özellikle güvenlik sistemlerinin tasarımlarında depreme dayanıklılığı arttırmak amacıyla çok sayıda değişiklik yapılacağını öngörmek çok da yanlış olmayacaktır.

Bunun ötesinde tsunami gerçekleşebilecek bölgelerde yapılması düşünülen santraller için deprem ve tsunani hem ayrı ayrı hep bir arada incelenmelidir. Fukuşima Nükleer Santralinde meydana gelen kazada pek çok etken aynı anda gerçekleşerek reaktörlerin kontrolünü zorlaştırmıştır. Tasarımlarda öngörülen deprem şiddeti ve tsunami yüksekliğinin çok üstünde bir deprem ve tsunamiler gerçekleşmiştir. Derinliğine güvenlik ilkesi ile yeni tasarımlarda buradan çıkarılan dersler yapılacak değişikliklerle kendisini gösterecektir. Tasarımlarda yapılacak önemli bir değişiklik de malzemelerin deniz suyuna dayanıklılığı ile ilgili olacaktır. Japonya tarihinin en şiddetli depremiyle karşı karşıya iken, neredeyse tüm alt yapısını ve güç üretim mekanizmalarını kaybetmiştir. Uzunca zaman şebeke hatlarına elektrik verilememiş ayrıca temiz su kaynakları kullanım dışı kalmıştır. Bu sebeple uzunca bir süre reaktörler deniz suyu ile soğutulmuştur. Bu da gerek güvenlik sistemi elemanlarına gerekse diğer önemli sistem bileşenlerine ciddi hasarlar vermiştir. Kazadan bu yana sektördeki en ivmeli hareketlenmeler malzeme alanında kendisini göstermektedir. Buna ek olarak uzun süre şebekeye elektrik verilememesi ve tsunamiler sırasında dizel jeneratörlerin kaybedilmesi ile uzun dönem terminal kararması (long term station blackout, LT-SBO) yaşanmıştır. Elektriğin olmaması reaktör parametrelerinin izlenmesinde kullanılan ölçme ve görüntüleme sistemlerinin büyük bölümünün kullanımını imkansız hale getirmiştir. Bu sebeple müdahale imkanları azaldığından reaktörlerin kontrolü zorlaşmıştır. LT-SBO ve bu konudaki güvenlik analizleri, sektörde önemini arttırmış ve tasarımlarda öngörülen olabilecek en büyük kazalar arasında daha derinlemesine tartışılmaya başlanmıştır. Tasarımlarda LT-SBO'ya yönelik ilave güvenlik önlemleri düşünülmektedir. Ayrıca bu tip kazalar gerçekleştiğinde uygulanmak üzere yeni kaza yönetim prosedürleri oluşturulmalıdır.

Basınç kabı dışındaki (ikincil koruma kabında) hidrojen birikimi ve buna bağlı olarak gerçekleşen patlamalar göstermiştir ki tasarımlarda kaza anında reaktör binasında birikebilecek hidrojenin tahliyesine yönelik ilave tasarımlara ihtiyaç vardır. Önemli bir diğer noktada reaktör binasının hasar alması durumunda bu tip koruma kabına (MARK I) sahip reaktörlerde kullanılmış yakıt havuzlarındaki radyoaktif maddelerin korunması zorlaşmaktadır. İlk olarak akla gelen bundan sonraki tasarımlarda kullanılmış yakıtın reaktörle aynı bina içerisinde muhafaza edilmemesi gerektiğidir. Elbette nükleer güvenlik düzenleme ve denetleme mevzuatlarında da bazı değişiklikler yapılarak denetlemelerde dikkat edilecek hususların kapsamı genişletilecektir.

Santralde tüm tedbirlere rağmen, santral güvenliği tehlikeye girdiğinde, santralde olanları izlemek üzere, direk yönetim otoritelerine bağlı ve bu otoritelere rapor vermekle sorumlu acil durum birimleri oluşturulabilir. Bu

birimlere radyasyonun insan sağlığına etkileri konusunda bilgi birikimine sahip doktorları da içermesi düşünülebilir. Acil durum yönetimi için her santralin her nitesi için ayrı prosedürlerin belirlenmesi ve ayrı birimlerin oluşturulması da acil durum yönetimi anlayışı çerçevesinde değerlendirilebilir.

[11]

Kaza esnasında yerel halka ve dünya geneline yapılan bilgilendirmeler ilk etapta yetersiz olmakla beraber kısa bir süre sonra Japon yetkililer kamuoyuna son derece açık bir kaza yönetimi gerçekleştirmişlerdir. Halk sağlığı açısından önlemlerin hızla alınması ve tahliyelerin hızla gerçekleştirilmesi büyük l de halkın korunmasını sağlamıştır. TEPCO ve Japonya yönetiminin ilgili kurumlarının (NISA, JAIF, vb) kaza yönetimi çalışmaları kazanın sonuçlarını hafifletmiştir. Bu açıdan da tüm sektöre bir ders niteliğindedir.

Yeni tasarımlarda dikkate alınacak derslerin çıkarılması yanı sıra halihazırda işletimde olan reaktörlerin incelenmesi için çalışmalar hızla yürütülmüştür. Kazadan ıkarılan dersler ışığında başta Amerika Birleşik Devletleri olmak üzere BWR tipi reaktörlere sahip ülkeler, ülkelerindeki bu tip reaktörleri denetime tabi tutmuş ve gerekli iyileştirmeler yapılmaya ve ilave güvenlik önlemleri almaya başlamışlardır. Aşağıdaki tabloda çıkarılan kimi dersler ve halihazırda çalışmakta olan reaktörlerde ve yeni tasarımlarda yer verilebilecek olan kimi yeni düzenlemeler özetlenmiştir. [12]

Tablo 3. Fukuşima Nükleer Kazasından Çıkarılan Dersler ve Öneriler

Çıkarılan Ders	İşletimde olan reaktörler için tedbirler	Yeni tasarımlarda dikkat gerektiren hususlar
Saha dışı ve saha içi AC gücün tamamen kaybedilmesi DC bataryaların çabuk tükenmesine neden olmuştur bu da LT-SBO'ya sebebiyet vermiştir.	<ul style="list-style-type: none"> • Dizel jeneratörler, yakıtları ve ilgili ekipmanlar su geçirmez odalarda su basmasına karşı yeterince yüksekte muhafaza edilebilir. • Şirketler taşınabilir dizel jeneratörler edinmeli ve reaktöre çabuk ulaştırılabilir bir mesafeye yerleştirmelidir. 	LT-SBO senaryoları dikkatle incelenmeli ve bu gibi bir kaza durumunda devreye girecek ilave aktif ve pasif güvenlik sistemleri tasarlanmalıdır.
Kaza öncesinde deprem ve tsunamide ölen veya yaralanan işçi sayısının çok fazla olması durumunda kazaya müdahalenin gecikmesine sebep olabilirdi.	Bu tip kaza durumlarında acil müdahale edebilecek bilgi ve eğitime sahip bir ekip oluşturulmalı ve her an hazır bekletilmelidir.	
Kaza sürecinde halkın bilgilendirilmesi sırasında pek çok birim kullanılmıştır (doz, doz eşdeğeri, aktivite). Bu da halkın kazanın boyutlarını algılamasını zorlaştırmıştır.	Kaza sonrası radyasyon riskleri halka anlatılırken doz birim olarak kullanılmalıdır. Örneğin tıpta yer alan uygulamalardan örnekler verilerek karşılaştırmalı bir farkındalık yaratılabilir.	
Yakıtların soğutulmasındaki yetersizlik sonucu hızlı bir paslanma sürecinin ardından büyük miktarda hidrojen üretimi gerçekleşmiştir. Ünite 1 ve 3'de gerçekleşen patlamalar bu hidrojen sebebiyle	<ul style="list-style-type: none"> • Güce ihtiyaç duyulmasızın hidrojenin basınç kabından tahliyesi sağlanmalıdır. Tahliye edilen hidrojenin reaktör binasında birikmemesi için bu tahliyenin bir borulama sistemi ile yapılarak reaktör binasından dışarı çıkarılması sağlanabilir. • Ufak kaçaklar için ise, reaktör binasının üstünde biriktiği tahmin edilen hidrojen için kullanılan rekombine maddelerinin arttırılması düşünülebilir. 	

<p>olmuştur. Hidrojen oluşumu ve reaktör binasında birikimi azaltılmaya çalışılmalıdır.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Yakıt zarf malzemesi olarak kullanılan ve buhar ile reaksiyonu sonucu hidrojen üretimine sebep olan Zirkaloy alaşımı yerine zarf malzemesi olarak oksidasyon yapma olasılığı daha az olan farklı malzemeler kullanılabilir. (Örneğin, SiC) 	
<p>SBO sebebiyle operatörler ana koruma kabının basıncını düşürmek için bazı gazların reaktör binasına tahliyesini gerçekleştirmiştir. Reaktör binasında tahliye sistemi olmadığından reaktör binalarında hidrojene bağlı patlamalara sebep olmuştur.</p>	<p>Ana koruma kabı, soğutma yapılamadığı durumda direkt olarak depolama tanklarına tahliye edilmelidir.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • AC güç kaybedildiğinde, pasif ana koruma kabı soğutma sistemleri tahliye gerektirmeden devreye girecek ve efektif olarak çalışabilecek şekilde tasarlanmalıdır. • Ana koruma kabında soğutma yapılamıyorken, ana koruma kabı basıncı ve çevreye bırakılan radyoaktivite arasında bir denge oluşturacak bir yaklaşım ile Fransa ve İsviçre örneklerinde olduğu gibi filtreli ana koruma kabı tahliye sistemleri kullanılabilir.
<p>Reaktör binasında yükseğe yerleştirilmiş olması sebebiyle kullanılan yakıt havuzları hidrojen patlamalarından dolayı zarar görmüşlerdir. Yükseğe yerleştirilmiş olmaları sebebiyle depremde de fazla etkilenmiş olabilecekleri düşünülebilir. Bu kaza sırasında çevreye yayılan radyasyonun önemli bir kısmı bu havuzlardan kaynaklanmış olabilir.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Kullanılmış yakıtlar mümkün olan en kısa sürede kuru depolama ünitelerine taşınmalıdır. Ancak bu üniteler de deprem ve tsunamiye dayanıklı olarak tasarlanmalıdır. • Halihazırda aktif olan havuzlar için pasif koruma önlemleri düşünülmelidir. • Kullanılmış yakıt havuzlarının kullanımı ve yakıt değişim işlemleri için yeni düzenlemeler yapılmalıdır. 	<ul style="list-style-type: none"> • Kullanılmış yakıt havuzları ana koruma kabına benzer yapılar içerisinde olmak üzere reaktör binasından ayrı bir bina da yer alabilir. • Bölgesel ve ulusal kullanılan yakıt merkezleri kurularak kullanılan yakıtların santralden en kısa sürede tahliyesi sağlanabilir. Japonya zaten inşaatını tamamladığı ve tüm reaktörlerindeki kullanılan yakıtları bir araya getirmek için çalışmalarını yürüttüğü bir yeniden işleme tesisine sahiptir.

<p>Santralde reaktörlerin yerleşimi sebebiyle bir ünite meydana gelen problemler komşu ünitelerde de güvenlik problemlerine sebep olmuştur. Örneğin 3. Ünite gerçeğeşen hidrojen patlaması sebebiyle 2. Üniteye denizden su basılmasını sağlayan pompalar durmuştur. İlk dört üniteden daha uzak bir lokasyonda olan 5. ve 6. üniteler ise gerçeğeşen hidrojen patlamalarından etkilenmemişlerdir. Ayrıca 4. ünitedeki yangın ve patlamanın 3. ünitedeki hidrojenin ortak kullanılan kanaldan sızmasından kaynaklandığı düşünölmektedir.</p>	<ul style="list-style-type: none">• Çok üniteli santrallerde depo, kanal ve yedek araçların ortak kullanımından kaçınılmalıdır.• Su basmalarına karşı en azından bir dizel jeneratör daha yüksek bir noktada konumlandırılmalıdır.• Halihazırda kullanılan sahalara ek ünite inşa edilecekse, park alanları ve yardımcı binalar diğer üniteler arasına yerleştirilmelidir ki böylece ünitelerin birbirinden uzak konumlandırılması sağlanabilir.	<ul style="list-style-type: none">• Yeni inşa edilecek santrallerde yer seçimi yapılırken sismik hareketlerin en az olduğu bölgeler seçilmelidir. Özellikle kıyı bölgelerinde büyük deprem, buna bağlı tsunami oluşumu ve su basmaları dikkatle incelenmelidir. (Şimdiye kadar inşa edilmiş reaktörlerin büyük kısmı sismik hareketin en az olduğu yerlere yerleştirilmiştir. Ancak Japonya, Tayvan ve Kaliforniya bunun dışındadır, bu sebeple tasarımlar güçlendirilmiştir.)• Bir sahada izin verilecek toplam ünite sayısı reaktörlerin takibi, ortak kullanılacak binalar, acil güvenlik araçları ve sahada çalışacak eleman sayısı gibi diğer faktörler de göz önüne alınarak güvenlik ve ekonomik getirileri göz önüne alınarak hesaplanmalı ve standartlaştırılmalıdır.
--	--	---

10. Sonsöz

11 Mart 2011’de meydana gelen deprem ve tsunami felaketinin Fukuşima Nükleer Santrali’nde yol açtığı nükleer kaza, olayların başladığı günden bu yana gerek Japon hükümeti yetkilileri ve ilgili resmi kurumları gerekse uluslararası kuruluşlar tarafından titizlikle takip edilmiştir. Kaza yönetimi ve kazanın sonuçlarının çevre ve halk üzerine etkileri açısından Japonya resmi kurumları şeffaf bir tutum izlemiştir. Kazanın gerçekleştiği nükleer santralin işletici firması olan TEPCO, kaza sonrasında alınabilecek önlemleri ivedilikle almaya çalışmış ve çevreye olabilecek radyoaktif salınımları en aza indirme yönünde özverili bir çalışma yürütmüştür.

Bu kaza ile nükleer santrallerinin tasarımında dikkate alınması gereken senaryolara yenileri eklenmiştir. Kazada uzun dönem saha kararması da yaşanmıştır. Bundan sonra yapılacak güvenlik analizlerinde uzun dönem saha kararmasının oldukça detaylı olarak dahil edilmesi düşünülmektedir. Doğal afetlere karşı alınan önlemlerde de çeşitliliğe gidilmesi, santral sahası içinde reaktörlerin konumlandırılması ve acil durum güvenlik sistemlerinin her ünite için ayrı olarak tasarlanmasına yönelik değişiklikler yapılması öngörülmektedir. Elbette sektör bu kazanın sonuçlarından dersler çıkaracak ve bu dersler ışığında tasarımlarda yeniliklere gidilecektir.

Kazaya dünya genelinde verilen tepkiler ülkelere göre farklılık göstermiştir. Almanya eski nükleer santrallerinin tamamını kapatma kararını açıklarken, İtalya’da ülkede nükleer santral yapılmasına yönelik gerçekleştirilen halk oylamasında halk olumsuz görüş bildirmiştir. Öte yandan Fransa 60. nükleer reaktörünü inşa edeceğini duyurmuştur. Gelişmekte olan bazı Avrupa ülkelerinde kaza öncesi belirlenen takvimlere uygun olarak kimi nükleer santral inşaatlarına başlanmış kimilerinin ise inşaat öncesi çalışmalarına devam edilmektedir. Öte yandan dünyanın en hızlı gelişen ekonomilerine sahip olan Çin ve Hindistan’ın nükleer santral kurulum faaliyetleri aralıksız olarak sürdürülmektedir. Küçük ve orta ölçekli reaktör teknolojisini hayata geçirmeye hazırlanan ABD, kaza sonrasında sahip olduğu nükleer santrallerin güvenlik analizlerini gözden geçirmiş, gerekli iyileştirmeleri yaparak güvenlik sistemlerini güçlendirmiştir.

Ülkelerin enerji ihtiyaçlarının her geçen gün artması ve gerek çevresel faktörler gerekse rezervlerin hızla tüketiliyor olması göz önüne alındığında elektrik üretiminde enerji kaynaklarında çeşitliliğe gidilmesinin zorunlu olması sebebiyle nükleer enerji elektrik üretiminde yaygın olarak kullanılmaya devam edecektir. Bugün politik kararlar verilerek nükleer

enerjiden vazgececeğini açıklayan devletler şimdiden ekonomik kayıplarını bertaraf edebilmek için devreden çıkardıkları santralleri kademeli olarak tekrar devreye almışlardır. Baz güç üretimi yapan nükleer santrallere ihtiyaç, enerji ihtiyacıyla doğru orantılı olarak artmaya devam edecektir. Tüm bu sebepler göz önüne alındığında, şu anda inşaatı devam eden nükleer santrallere bakıldığında daha güvenli, daha çevreci ve daha ekonomik nükleer enerji kullanımını sağlayan yeni nesil nükleer santrallerin dünya genelinde yaygınlaşmasının bir tesadüf olmadığı söylenebilir.

11. Kaynakça

1. <http://www.iaea.org/cgi-in/db.page.pl/pris.powrea.htm?country=JP&sort=&sortlong=Alphabetic>
2. http://www.world-nuclear.org/info/fukushima_accident_inf129.html
3. <http://iaea.org/newscenter/news/tsunamiupdate01.html>
4. Nuclear Emergency Response Headquarters, Nuclear Emergency Response Headquarters, Additional Report of the Japanese Government to the IAEA: The Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations (Second Report), September 2011
5. http://www.world-nuclear-news.org/RS_Fukushima_moved_to_Level_7_1204111.html
6. An Assessment by the NEA Committee on Radiation Protection and Public Health, Chernobyl Ten Years On: Radiological and Health Impact, OECD Nuclear Energy Agency, November 1995
7. Nuclear Emergency Response Headquarters, Report of the Japanese Government to the IAEA Ministerial Conference on Nuclear Safety : The Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations, June 2011
8. http://www.jaif.or.jp/english/news_images/pdf/ENGNEWS01_1303782365P.pdf
9. <http://www.bbc.co.uk/news/world-asia-pacific-13107846>
10. <http://www.world-nuclear-news.org/newsarticle.aspx?id=30901&terms=fukushima%20cold%20shutdown>
11. Yard. Doç. Dr. Şule Ergün, Hacettepe Üniversitesi, Nükleer Enerji Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi

12. Buongiorno, J., Ballinger, R., Driscoll, M., Forget, B., Forsberg, N., Golay, M., Kazimi, M., Todreas, N., Yanch, J., Technical Lessons Learned from the Fukushima-Daichii Accident and Possible Corrective Actions for the Nuclear Industry: An Initial Evaluation, May 2011