TEKNİK RAPOR: FUKUSHIMA KAZA ÖZETİ (19 AĞUSTOS 2011)

Technical Report: Fukushima Accident Summary (Aug. 19, 2011)[1]

Ritsuo Yoshioka[2], *Kenji Iino*[2]

Japonya'da 11 Mart 2011 tarihinde gerçekleşen 9.0 büyüklüğündeki deprem ve sonrasında oluşan tsunami, Fukushima Nükleer Enerji Santrali'nden çevreye radyasyon yayılmasına neden olmuş, ülkemizde de gündemde olan nükleer enerji konusunu tüm dünyada bir kez daha tartışılır duruma getirmiştir.

Japon Hükümeti, Fukushima'daki kazanın Çernobil kazasının 1/10'u kadar radyoaktivite yaydığını açıklamıştır. Kaza seviyesi, INES (Uluslararası Nükleer Olaylar Ölçeği) derecelendirmesine göre en ciddi seviyedir (Seviye 7) ve Çernobil'le eşit seviyedir.

Fukushima kazası üzerine İnceleme Kurumu tarafından hazırlanan raporu, kazanın yıl dönümünde, iki bölüm halinde yayınlıyoruz. Bu bölümde, gerçekleşen deprem ve tsunami hakkında bilgiler, Fukushima-1 ve Fukushima-2 reaktörlerindeki olaylar örgüsü; yayınlanacak ikinci bölümde ise Fukushima-3, Fukushima-4 ve Fukushima-5 ve 6 reaktörlerinde gerçekleşen olaylar ile raporun sonuç bölümü yer almaktadır.

Yazarların da belirttiği üzere: "Fukushima kazası henüz sonuçlanmış değildir. Sonunda amaç tüm nükleer reaktörlerin tamamen kullanımdan kaldırılması olacaksa bunun yürürlüğe girmesi on yılları alacaktır. Bu nedenle, çalışmada sadece Fukushima kazasının doğrudan nedenleri ve süreçleri üzerinde durulmuştur. Kazanın asıl nedeninin ve arka planının ayrıntılı olarak araştırılması gerekmektedir."

ÖZET

11 Mart 2011 tarihinde 9.0 büyüklüğündeki Tohoku Pasifik Depremi Japonya'nın kuzeydoğusunu vurmuştur. Yaklaşık yarım saat sonra Tsunami dalgaları kıyıya vurarak binaları, tesisleri, otomobilleri, ağaçları ve neredeyse yoluna çıkan her şeyi yerle bir etmiştir. 15 binin üzerinde insan bu olayda hayatını kaybetmiştir (8 Ağustos itibarıyla) ve ölenlerin sayısı her geçen gün artmaktadır.

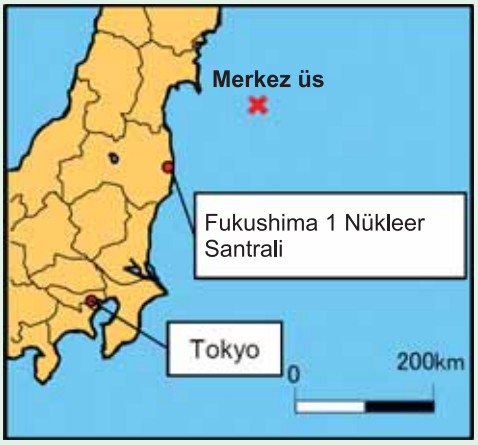
Deprem ve tsunami, Tokyo Elektrik Enerjisi Anonim Şirketi (TEPCO) tarafından işletilen 1 Numaralı Fukushima Nükleer Enerji Santrali'nin Kaynar Su Reaktörlerinin (BWR: Boiling Water Reactors) 6 biriminde beklenmedik kazalara yol açmıştır. Basılı bilgilere dayanan bu rapor, kazaların nedenlerini ve süreçlerini özetlemektedir.

1. GİRİŞ

Deprem ve onu izleyen tsunami dalgalarının yarattığı doğal afetler sonucunda Fukushima 1 Nükleer Enerji Santrali'nde meydana gelen kazalar, Uluslararası Nükleer Olaylar Ölçeğine (INES) göre Seviye-7 olarak ölçeklendirilmiştir. Bu seviye en kötü seviye olarak bilinmektedir. Şekil 1 enerji santralinin yerini ve depremin merkez üssünü göstermektedir.

Özellikle 12 Mart'ta gerçekleşen ilk hidrojen gazı patlamasının ardından çıkan haberler şok dalgalarını tüm dünyaya duyurmuştur. ABD, Fransa ve diğer ülkeler etkisi sürmekte olan kazanın kontrol altına alınması için yardım önerisinde bulunurken, çoğu yabancı hükümet de halklarına bölgeyi terk etmeleri konusunda çağrıda bulunmuştur. Kazalar yayılmaya devam ederken anti nükleer hareket dünya çapında sesini yükseltmeye başlamıştır. Alman hükümeti 2022 yılı itibarıyla nükleer enerji üretimini durduracağını açıklamıştır. Öte yandan Rusya ve Çin, hâlihazırdaki nükleer enerji planlarını sürdürecek gibi gözükmektedir [1].

İster bu teknoloji terk edilsin isterse üretilmeye devam edilsin, bu kazaların



Şekil 1. Fukushima 1 Nükleer Santrali'nin Konumu

[1] *ASF (Association for the Sudy of Failure) web sitesinde online makale olarak yayınlanan yazının İngilizcesine http://www.shippai.org/images/ html/news559/FukuAccSummary110819Final.pdf bağlantısından erişilebilir.*

[2] *Ritsuo Yoshioka: Japonya İşlevsel Güvenlik Laboratuvarı Başkanı. Osaka Üniversitesi Nükleer Enerji Mühendisliği Bölümü'ndan yüksek lisans derecesini aldıktan sonra 1970'den itibaren Toshiba Nükleer Enerji Bölümünde, Fukushima-3/5 de dâhil olmak üzere reaktör tasarımı ve lisanslaması alanında görev yapmıştır. 2004 yılında Toshiba'dan emekli olmuştur. 2005'te Japonya İşlevsel Güvenlik Laboratuvarını kurmuş ve bilgisayarlı sistemler için sistem güvenliği dersleri vermiştir. 2011'de NPO Arıza İnceleme Kurumunun başkanı olmuştur.*

Kenji lino: SYDROSE LP komandite ortağı. Tokyo Üniversitesi'nden MEngME derecesini almış, ABD'ye gelerek GE Nükleer Enerji için çalışmıştır. Stanford Üniversitesi Tasarım Bölümü'nden doktorasını aldıktan sonra Ricoh Şirketi Yazılım Araştırma Merkezi'nde çalışmıştır. 2000 yılında SYDROSE LP'yi kurmuştur. 2002'de kurulan NPO Arıza İnceleme Kurumunun kurucu ortaklarındandır.

neden ortaya çıktığı ve nasıl ilerlediği konusunda mutlaka bilgi edinmemiz gerekmektedir. Resmi araştırmaların sonlandırılması aylar alsa da (tesisin içinde çalışmayı engelleyen yüksek radyasyon oranı dolayısıyla), şu an itibarıyla sahip olduğumuz bilgilere dayalı olarak bazı sonuçlar çıkarabilir, olayların altında yatan nedenleri ortaya koyabiliriz.

Bölüm 2'de felaketin tüm nükleer santral üzerindeki etkileri ele alınmaktadır. Bölüm 3'te 6 BWR ünitesinin her birinin durumuna yakından bakacağız. Bölüm 4'te raporumuzu sonlandıracağız. Gelecekte radyasyon seviyeleri arttıkça şu anki açıklamalarımızla çelişen deliller ortaya çıkabileceğini belirtmek isteriz.

2. DEPREM VE TSUNAMİ

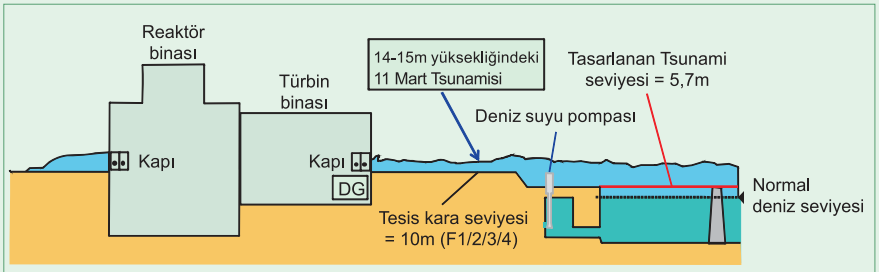
2.1 Deprem

Tohoku Pasifik Depremi 11 Mart, 2011 saat 14:46'da Japonya'nın kuzeydoğu kıyısının 80 mil uzaklığında okyanus derinliğinde meydana gelmiştir. Büyüklüğü 9.0'dır. 1 Numaralı Fukushima Nükleer Santrali'nin tüm reaktörleri, 1, 2 ve 3. Birimler (F1, F2 ve F3), tüm kontrol çubuklarının reaktör koru içerisine tam olarak sokulabilmesi için devre dışı bırakılmışlardır. Bu arada, F4/5/6 periyodik bakım aşamasındadır.

Deprem, F1/2/3/4'e dışarıdan elektrik enerjisi sağlayan tüm donanımları yarı ya da tam hasarlı bir hâle getirmiştir. Donanımlar, yürürlükteki Japon lisans koşullarına uygun olarak en düşük sismik standartlara göre tasarlanmıştır. Deprem aynı zamanda F5/6'ya dışarıdan enerji sağlayan çelik kuleyi de yıkmıştır. Bu enerji hattı sağlam kalabilmiş olsaydı, F1/2/3/4 reaktörleri depremin ardından günlerce ayakta kalabilir, bu süre içerisinde soğutma sorununun çözülmesine olanak tanıyabilirdi. Reaktörlerin kapatılmasının ardından Dizel Jeneratörler (DG) otomatik olarak devreye girmiştir. Her bir reaktör 2 DG'li temel tasarıma sahipti.

2.2 Tsunami

Daha sonra 14-15 metre yüksekliğindeki tsunami saat 15:27 itibarıyla kıyıya vurmuş, bunu aynı gün saat 15:41'e kadar süren tsunami dalgaları izlemiştir. Tsunami, bir tanesi dışındaki tüm DG'leri su altında bırakmıştır (Şekil 2). Tüm DG'ler türbin binalarının bodrum katına monte edilmişti. Ayakta kalan tek jeneratör ise reaktör binasındaydı. Reaktör yapılarının tsunamiye dayanıklı olduğuna inanılmaktadır.



Şekil 2. Fukushima Tesislerinin Deniz Seviyesinden Yüksekliği [2]

Şekil 3. Mark-I Koruma Kabuğu [3]

Öte yandan türbin binalarının depreme karşı sismik tasarım seviyesi en düşük seviyedir. Üreticilerin DG'leri neden bodrum katına yapmayı tercih ettikleri belirsiz bir konudur. Geriye dönüp bakıldığında, doğru olarak tasarlanmaları gerekirdi. DG'lerden üçü hava soğutma sistemine sahipti ve bunların da bir tanesi F6'nın reaktör binasına monte edilmişti. Bu DG, tsunamide ayakta kalan tek DG idi ve F5/6'yı ayakta tutabilmişti.

Saat 15:41'de diğer tüm DG'ler kaybedilmiş, F1/2/3'ün elektriği kesilmiştir (Station Black-Out: SBO, tüm AC güç kaynakları kaybedilmiştir). F2/3/4 bataryalarının bir kısmı ayakta kalabilmiştir, ancak bu bataryalar soğutma pompalarını kontrol ederken, işleyişlerini kontrol edecek şekilde tasarlanmamışlardır.

Bu nedenle özellikle F1/2/3'ün kor soğutma fonksiyonu yitirilmişti. Aynı zamanda F1/2/3/4'ün yakıt soğutma fonksiyonu da kaybedilmişti.

Tsunaminin önemli hasarlarından bir diğeri, dalgaların, hayati önem taşıyan bileşenlerin son ısı alıcısı görevini gören okyanus kıyısındaki tesislere vurmuş olmasıydı. Eğer tesisin elektriği sağlanabilmiş olsaydı (dış enerji veya AC olarak), reaktördeki nükleer yakıtın azaltılan ısısı basınç rahatlatma havuzu (şekilde "sulu kuyu torus" olarak gösterilmektedir) suya transfer edilebilirdi.

Basınç rahatlatma havuzu 2000 ile 3000 ton arası suya transfer edilen ısı,

Şekil 4. Deniz Suyu Soğutma Sistemleri Hasar Görmüştür [4]

bu durumda her yana yayılmaya devam edecekti ve normal olarak son ısı alıcısı olan denize yönelecekti.

Tsunami deniz suyu soğutma sistemlerinin çoğunu çökerttiğinden (Şekil 4'te gösterilmektedir), kor soğutma fonksiyonu er geç yitirilecekti.

3. REAKTÖR 1'DEN REAKTÖR 4'E KADAR TÜM REAKTÖRLERDEKİ OLAYLAR ÖRGÜSÜ

Bu bölümde 1 ile 4 numaraları reaktörlerdeki hasarlara ve bunu izleyen olaylara yer verilecektir. Ağır hasar görmeyen 5 ve 6 numaralı birimlere bölümün sonunda kısaca değinilecektir.

3.1 Fukushima-1 Reaktörü

3.1.1 F1 Erime süreci

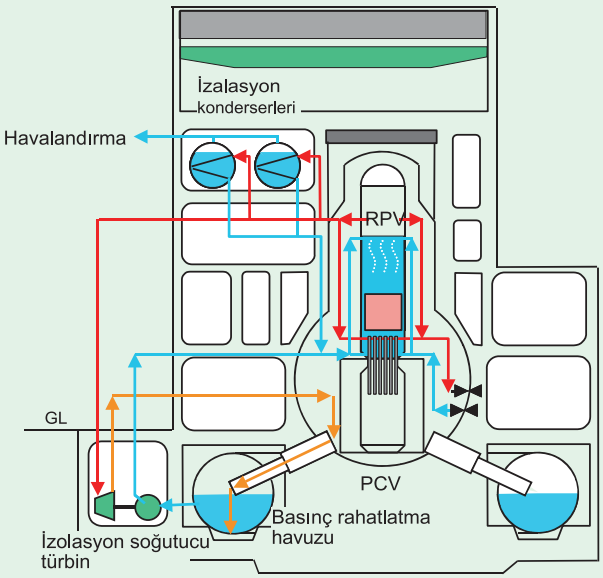
11 Mart, 14:52: Tüm AC enerjisi kaybedilmiş olsa da İzolasyon Kondenseri (IC) çalışmıştır. Reaktör binasının 4. katına monte edilmiş olan IC, soğuk su dolaşımı için elektriğe gereksinim duymamaktadır (Şekil 5). IC'nin ne kadar süreyle çalıştığı bilinmemektedir. Tasarlanan çalışma süresi sekiz saattir; ancak IC'yi kontrol eden türbin zeminindeki bataryalar da tsunamiden zarar görmüştür. Tahminimize göre TEPCO operatörleri IC'yi saatler boyunca sürekli olarak kapatıp açmışlardır.

Bu kor soğutma fonksiyonuyla beraber IC'nin aralıklı olarak çalıştırılması yetersiz kalmıştır ve yakıt sıcaklığı, yakıt arızası ortaya çıkaracak derecede yükselmiştir.

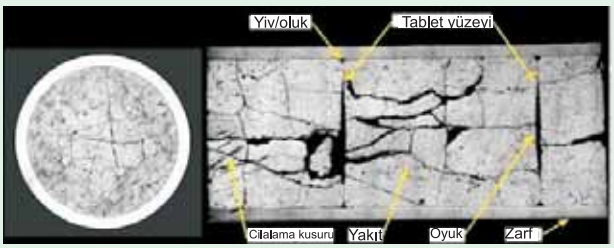
21:51: Reaktörde yüksek radyasyon seviyesi (290 mili-Sievert/saat: mSv/h) ölçülmüştür ve işçilerin binaya girmesine izin verilmemiştir. Bu yüksek radyasyonun, yakıt zarfının kırılması ve yakıttan çıkan radyoaktif gazın kaplamanın dışına sızması yüzünden ortaya çıktığını düşünmekteyiz. Ancak sızıntı yönü tam olarak açık değildir.

12 Mart, 00:00: TEPCO Birincil Koruma Kazanı (PCV: Primary Containment Vessel) havalandırmasını uygulamaya koymuştur.

01:00: PCV basıncı 0,6 Mpa'ya ulaşmıştır. PCV havalandırmasının



Şekil 5. F-1'in IC Sistemi



Şekil 6. Kullanılmış Yakıt Tabletlerinin Bölümleri [5]

"Kırılır Diski" 0,55Mpa'da kırılacak şekilde tasarlanmıştır. Böylece, bu an geldiğinde PCV havalandırması sağlanmıştı (3.1.2 numaralı bölümdeki 10:17 PCV başlığında sunulan tanımlamalara bakınız).

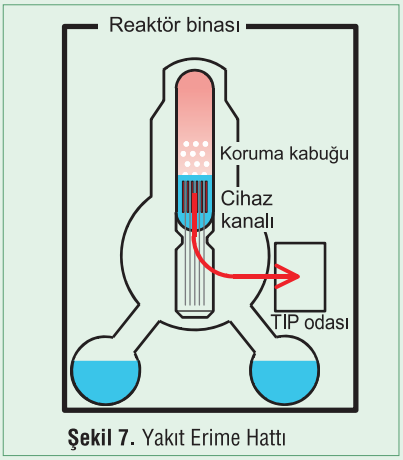
01:48: Sonunda IC durmuş ve su seviyesi yükselmiştir. Tahminimize göre kor degradasyonu (bozulması), yakıt zarfı sıcaklığının 1200 °C'ye çıktığı ve zarf tüplerinin zirkonyum oksidasyonunun başladığı bu noktada ortaya çıkmıştır. Yakıt zarfları bozulmuş, yüksek sıcaklık yakıt tabletleri Reaktör Basınç Kazanının (RPV: Reactor Pressure Vessel) dibine çökmüştür. Yakıt tabletleri korda radyasyona tutulduktan sonra Şekil 6'da gösterildiği gibi parçalara ayrılmaktadır.

Aynı zamanda ($Zr + 2H_2O = ZrO_2 + 2H_2$) kimyasal reaksiyonu ciddi oranda hidrojen gazı üretmiştir.

02:45: RPV basıncı 7,0Mpa'dan 0,95 Mpa'ya düşerken PCV basıncı 0,95 Mpa'ya yükselmiştir. Bu RPV'nin kırılması ve basıncının PCV basıncıyla aynı değere düşmesi anlamına geliyordu.

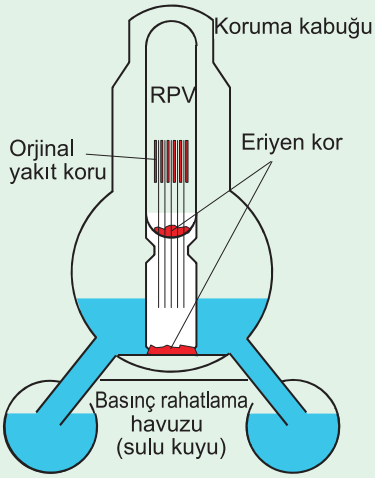
RPV kırılması nerede olmuştur?

F1'in TIP (Traversing In-core Prove) odasında yüksek radyasyon oranı gözlemlenmiştir. Oak Ridge Ulusal Laboratuvarı'nın (ORNL) açıklamalarına göre cihaz kılavuz kanalı RPV'nin dibindeki en zayıf noktaydı [6]. Bir nedenle çok sayıda kılavuz kanalının kırıldığını ve yakıt tabletlerinin bir kısmının bu delikler vasıtasıyla PCV'nin dibine çöktüğünü tahmin etmekteyiz. Yakıt tabletlerinin küçük parçaları reaktör binasının birinci katına ulaşmıştır. Yani, PCV de kırılmıştır.



Şekil 7. Yakıt Erime Hattı

New York Times, Nisan ayı 6. sayısında [7] NRC'den alınan bilgilere yer vermiştir. Şekil 8'in yer aldığı makalede yakıtın RPV'nin dibine yakıt tableti parçacıkları halinde çöktüğü belirtilmiştir. RPV'nin dip kısmı çatlak olduğundan yakıt alt tabakaya sızarak PCV'nin dibine kadar inmiştir. F1/2/3'ün şu anki durumuna ilişkin



Şekil 8. Yakıt Erime Durumu [7]

tahminlerimiz bunlardır. PCV'deki su seviyesi tahminlerimize dayalı olarak belirtilmiştir.

05:46: Yangın söndürme araçları su takviyesi yapmıştır (IC çalışmasaydı, 14 saat boyunca kor soğutması mümkün olmayacaktı). İki ay sonra TEPCO, hesaplama sonuçlarını ilettiği bir rapor yayınlamıştır. Eğer IC çalışmasaydı, yakıt tabletlerinin %100'ü 11 Mart gecesi 2800°C'ye ulaşabilirdi ve tüm yakıt RPV'nin dibine çökebilirdi. Eriyen kor daha sonra PCV'yi kırmıştır. Bu gerçek bir "Erime"dir. Bu arada TEPCO, F1'in RPV ve PCV'de pozitif basınç değerleri göstermekte olduğunu ve bu durumun da deliğin çok büyük olmadığını gösterdiğini belirtmektedir. Bu bir sırdır ve kimse bu olguyu şu ana kadar açıklayamamıştır. Tahminlerimize göre, IC'nin ve RPV'nin dibindeki suyun sağladığı soğumanın buna katkısı olmuş olabilir. İşte bu nedenle RPV'nin dibinde büyük bir delik oluşmamış olabilir.

08:30: Üç ay sonra, hükümet önemli bir bilgi yayınlamıştır. 12 Mart saat 08:30'da Fukuşima reaktörlerinin 7 km uzağında Te (Tellür)-132 ve İyot-132'ye rastlanmıştır. Te'nin buharlaşma sıcaklığı 988°C'dir ve bu durum yakıt tabletlerinin sıcaklığının 1000°C'nin üzerine çıktığının göstergesidir. Hükümetin bu bilgiyi hemen paylaşmamasının nedeni bilinmemektedir. Bu bilgi 12 Mart'ta açıklanmış olsaydı, sonrasında alınan önlemler daha iyi olabilirdi ya da hiç değilse reaktörlerin durumunu daha doğru bir şekilde anlama şansımız olabilirdi.

3.1.2 F1 PCV Havalandırması

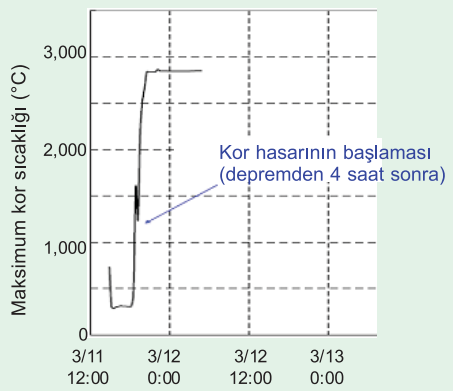
12 Mart, 10:17: PCV havalandırması denenmiştir (sulu kuyu havalandırması).

PCV basıncı kırılır disk referans değerine eriştikten sonra TEPCO havalandırma sağlamak için iki vanayı açmak zorunda kalmıştır. Vanalardan biri motorla (MO), diğeri ise havayla çalışmaktaydı (AO). Elektriğin kesilmiş olması ve bölgedeki yüksek radyasyon nedeniyle bu iki vananın açılması güç olduğundan, TEPCO'nun havalandırmayı çalıştırması dokuz saati bulmuştur. Havalandırmayı çalıştırmanın iki yolu vardı; ama TEPCO temel olarak sulu kuyu vasıtasıyla havalandırmayı tercih etmiştir. Sulu kuyu havalandırması adı verilen bu yöntem radyoaktif maddelerin çoğunu sulu kuyuda tutabilmekte ve radyoaktivitenin yayılmasını geniş oranda azaltabilmektedir.

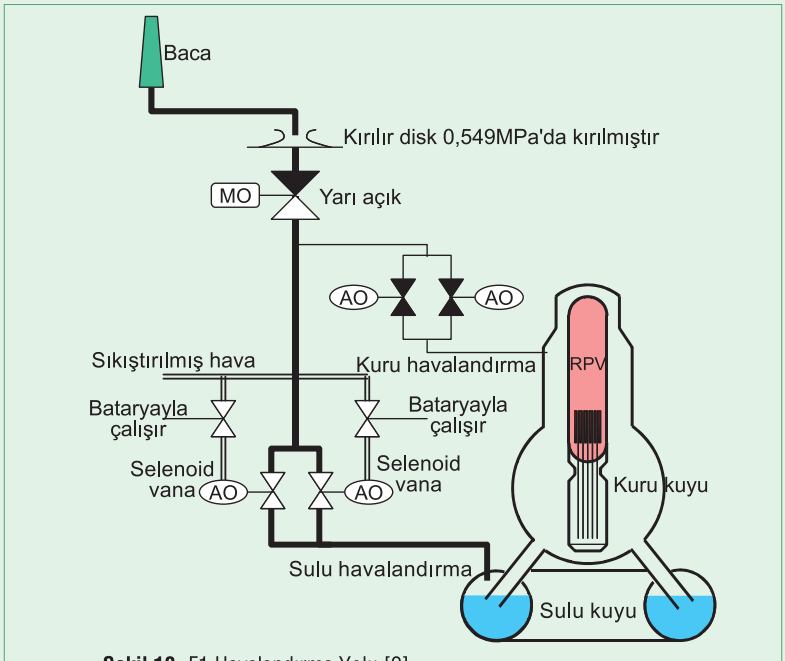
14:30: PCV havalandırması başarılı olmuştur (basınç azalmıştır).

PCV havalandırmasının amacı PCV'nin bütünlüğünü korumak amacıyla fazla basıncı serbest bırakmaktır. Ancak, yüksek sıcaklıktaki yakıt PCV'nin dibine sızdığında, sıcaklığı PCV'yi kıracaktır. Bu nedenle, PCV havalandırması kor soğutma fonksiyonu yitirildiğinde önemli bir katkı sağlamamaktadır.

Bu arada, PCV havalandırması, uzun bir baca aracılığıyla atmosfere radyoaktif madde (normalde PCV'nin içeriğinde bulunan iyot, sezyum, stronsiyum, tellür vb.) yaymaktadır. Bu tarz bir havalandırmadan yayılan radyoaktivite geniş bir alanın kirlenmesine neden olacaktır. Fukushima ilinde de böyle bir durum söz konusu olmuştur.



Şekil 9. F1 Maksimum Yakıt Sıcaklığı [8]



Şekil 10. F1 Havalandırma Yolu [9]

Zaman çizelgesi, PCV havalandırmasının ancak yakıtın yarı eriyik duruma gelmesiyle başlatılabildiğini göstermektedir. Bu nedenle, PCV havalandırması PCV'nin bütünlüğünü koruyamamıştır.

14:53: Temiz su enjeksiyonu durmuştur (nedeni bilinmemektedir).

3.1.3 F1 Hidrojen Patlaması

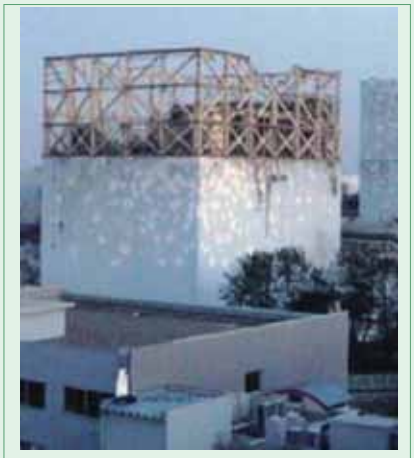
12 Mart, 15:36: F1 reaktör binasının tepesinde bir patlama olmuştur. En üst katın ve çatının yan duvarlarındaki beton paneller özellikle ince yapılır. Herhangi bir kaza sonrasında binada birikebilecek basınç karşısında kırılabilecek şekilde tasarlanmaktadır. Kırılabilir yapı binanın bütünlüğünü sağlamaktadır. Bu duvarlar kalın olsaydı, yüksek seviyede enerjiye sahip bir patlama tüm binayı ve PCV'yi tahrip edebilirdi. Bu tarz bir tasarımı neden tercih ettiklerini öğrenmek için deneyimli GE tasarımcılarına ulaşmaya çalıştık, ancak şu ana kadar başarılı olamadık.

İnanıyoruz ki tüm güvenlik uzmanları ciddi bir kaza durumunda reaktör korunda ciddi oranlarda hidrojen gazı üretileceğini bilmektedirler. BWR'nin PCV'si nitrojen gazıyla dolduğundan hidrojen patlaması olasılığı gözden kaçmış olabilir. Örneğin US-NRC tarafından hazırlanan ciddi bir kazanın raporunda reaktör binası içerisinde olabilecek bir hidrojen patlamasının tanımı yapılmamaktadır [10].

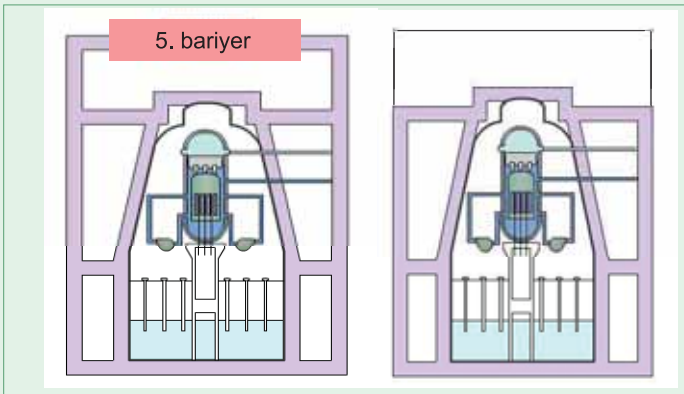
Hidrojen patlaması dünya çapında geniş yankı uyandırmıştır; çünkü reaktörün kendisinin patladığı izlenimini yaratmıştır. Elbette reaktör patlamamıştır.

Yukarıda açıkladığımız gibi duvarlar ve

Şekil 11. F1'deki Hidrojen Patlaması [4] (Bacalar 120 metre yüksekliğindedir)



Şekil 12. F1 En Üst Kat Tahrip Olmuştur. (12 Mart, TEPCO tarafından yayınlanmıştır)

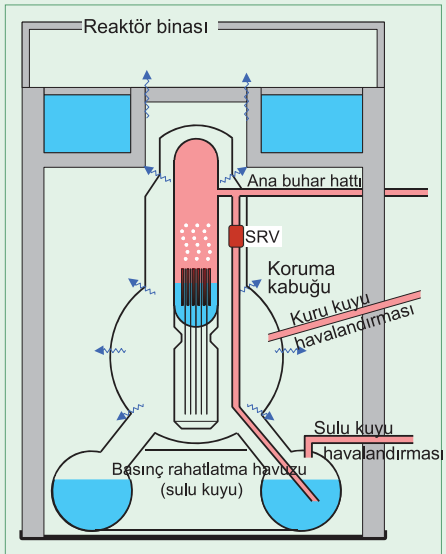


Şekil 13. 5. Duvarın Gerçek Kalınlığı

en üst katın çatısı ince bir yapıda tasarlanmıştır. Şekil 13'te sol tarafta gösterilen illüstrasyon hükümetin web sitesinde yayınlanmıştır. Burada reaktör binasının duvar kalınlığının 2 metre olduğu ve 5. bariyer olarak görev gördüğü bildirilmektedir. Bu açıklama yanlış yönlendiricidir ve bu bilgi kazadan sonra siteden kaldırılmıştır. Söz konusu şeklin Şekil 13'te sağda görülen şekil gibi olması gerekmektedir.

Hidrojen nereden sızmıştır?

Gizemini koruyan konulardan bir tanesi kordan reaktör binasının en üst katına kadar hidrojenin nasıl bir yol izlediğidir. Bu konu şu ana kadar açıklanmamıştır. En azından, korda üretilen hidrojen gazı RPV'den çıkıp SRV (Güvenlik Rahatlatma Vanası) yoluyla sulu kuyuya doğru yol almıştır. Ancak sulu kuyu içerisinde barınmamıştır; çünkü hidrojen suda



Şekil 14. Hidrojen Sızıntısının Yönü

çözülmemektedir. Bu nedenle sulu ve kuru kuyuların üst kısmına doğru hareket etmiştir. Kanımızca PCV havalandırması hidrojen sızıntısının nedeni değildir, çünkü havalandırılan buhar ve hidrojen gazı baca yoluyla atmosfere doğrudan iletilmektedir.

Hidrojen sızıntısının nedenlerinden biri PCV'nin sıkıca mühürlenmiş olmaması, borularda ve flanşlarda her zaman küçük sızıntılar olabilmesidir (Şekil 14). Fazla basınç bu durumu hızlandırabilmektedir.

Başka bir neden ise hidrojen gazı moleküllerinin küçük boyutudur. Moleküller, bu özellikleriyle PCV duvarlarının içine kolaylıkla girebilmektedir.

19:06: Deniz suyu enjeksiyonu başlamıştır. Bu reaktörün gelecekte enerji üretiminde kullanılamayacağı

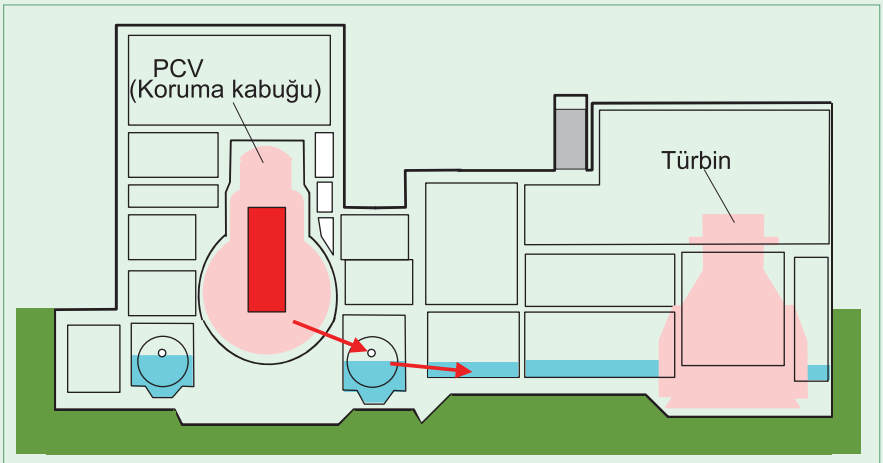
anlamına gelmektedir; böylelikle Fukushima-1 kaybedilmiştir.

RPV'nin dibinde ve PCV'nin değişik yerlerinde delikler bulunduğundan, enjekte edilen su reaktörün zemin katına inmiştir.

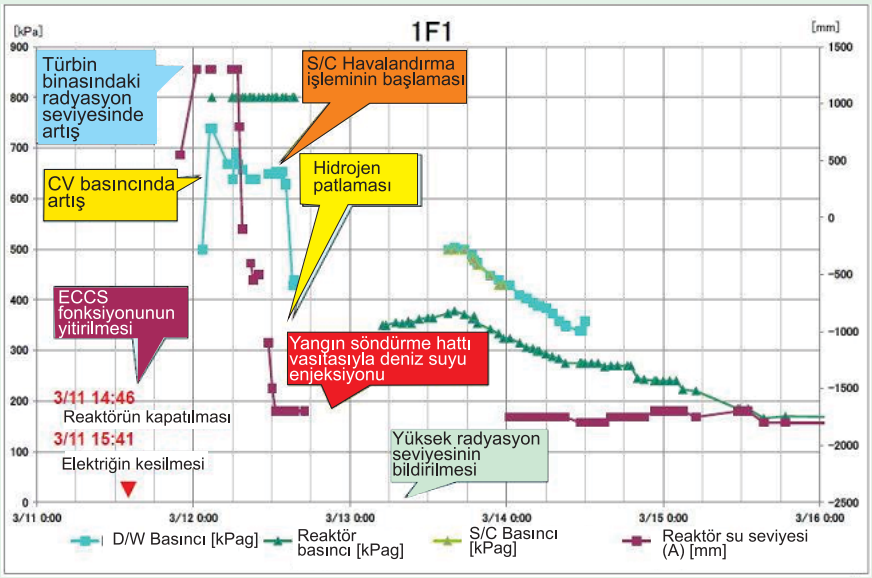
Nisan ayında TEPCO PCV'ye daha fazla su enjekte edip tamamen suyla doldurmayı denemiştir. 4 Nisan tarihli New York Times'da da değinildiği gibi, PCV'nin suyla doldurulması, onun ağırlığı yüzünden tahrip edilmesi gibi yeni bir tehdit oluşturacaktı [7]. Aynı zamanda RPV'yi dışarıdan soğutmak fiziksel olarak imkânsızdır, çünkü sıcaklık farkı çok düşüktür. Bir Japon gazetesi bu konuya değinmiş ve yazarlardan biri olan Yoshioka'nın görüşlerine de yer vermiştir. Ancak, gerçekte neredeyse suyun tümü RPV ve PCV'nin deliklerinden sızmıştır; bu nedenle TEPCO, PCV'yi suyla doldurma fikrinden vazgeçmiştir.

Türbin içindeki suda ve reaktör binasının zemin katında bulunan radyoaktiviteler ölçülmüştür. Ölçümler sonucunda İyot-131, Sezyum-134/137 ve düşük seviyelerde Stronsiyum-89/90 tespit edilmiştir. Stronsiyum'un buharlaşma sıcaklığı 1382 °C'dir. Bu sonuçlar yakıt sıcaklığının 1400 °C'nin üzerine çıkmış olabileceğini göstermektedir. Stronsiyum-89, Kripton-89 gazıyla (3dk'lık bir yarı ömür süresiyle), Stronsiyum 90 ise Kripton-90 gazıyla (0,5 dk'lık yarı ömür süresiyle) bozulmaktadır. Yakıt sıcaklığının ne kadar yükseldiği konusundaki belirsizlik sürmektedir.

Bu sonuçlar RPV'deki suyun PVC'ye gittiğini oradan da reaktör binasının zemin katına ulaştığını göstermektedir.



Şekil 15. Suyun Yönü



Şekil 16. F1 Reaktörünün 15 Mart'a Kadar Olan Verileri [4]

Tablo 1. F1 Binalarındaki Suda Bulunan Radyoaktivite

Nüklitler	Türbin binası (4/13)	Reaktör binası (5/27)
İyot-131	0,03	0,03
Sezyum-134	0,12	2,50
Sezyum-137	0,16	2,90
Baryum-140	Bulunmamıştır	Bulunmamıştır
Stronsiyum-89	57e-6	Ölçülmemiştir
Stronsiyum-90	21e-6	Ölçülmemiştir

Birim: milyon Bq (Becquerel)/cc

Reaktör binası ve türbin binası arasındaki penetrasyon delikleri suyun türbin binasının zeminine ulaşmasına olanak tanımaktadır (Şekil 15 bu durumu göstermektedir).

Uranyum ve Plütonyum gibi nükleer yakıt maddeleri üstteki suda bulunmamıştır. Ancak, yakıt parçacıkları olası delikler vasıtasıyla hasarlı PCV'ye çökmüş olduğundan, suyla dışarı taşınamamışlardır. TEPCO şu anda deniz kirliliğini önlemek amacıyla su sirkülasyon sistemini çalıştırmaktadır.

Şekil 16, ilk birkaç gün için F1'deki basınç ve su seviyeleriyle birlikte olaylar örgüsünü göstermektedir.

3.1.4 F1 Kullanılmış Yakıt Havuzu

Kullanılmış yakıt havuzundaki durum belirsizdir, çünkü çatı paneli havuzun içine göçmüştür ve buradan yakıtın durumuyla ilgili sağlıklı bilgiler elde edememekteyiz. Ancak en azından havuz soğutulmaktadır.

3.1.5 F1 Sonuç

F1'in "yarı erime" halinde olduğu sonucuna varmış bulunuyoruz (yani yakıt tabletleri 1400°C'yi veya üstünü görmüş, ancak 2800 °C'yi geçmemiştir). Kızgın yakıt RPV'nin tabanına çökmüş, burada delikler oluşturarak PCV'nin tabanına kadar ilerlemiştir. PCV'de kızgın yakıt nedeniyle hasar görmüştür.

Kullanılmış yakıt havuzunun durumu belirsizdir.

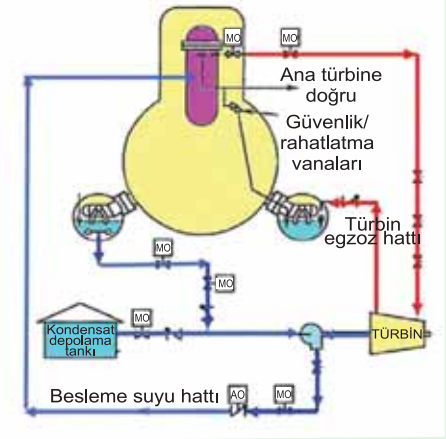
3.2 Fukushima-2 Reaktörü

3.2.1 F2 Erime Süreci

11 Mart, 14:50: Depremin hemen ardından, Reaktör Kor İzolasyon Soğutma Sistemi (RCIC: Reactor Core Isolation Cooling System) manuel olarak çalıştırılmıştır. RCIC, reaktörden aldığı buharla çalışan bir buhar türbini tarafından tahrik edilen bir acil pompalama sistemidir. RCIC aynı zamanda depolama tankı veya basınç rahatlatma havuzu vasıtasıyla reaktör korunu suyla beslemektedir. RCIC'i kumanda eden batarya tsunami sonrasında çalışır durumdaydı. RCIC, F2'yi ilk SBO aşamasında kurtarmıştır; ancak, tsunami deniz suyu soğutma sistemini çökerttiğinden, basınç rahatlatma havuzundaki ısı birikimi önlenememiştir.

12 Mart, 04:20: RCIC, depolama tankındaki su seviyesi azaldığı için basınç rahatlatma havuzunun suyunu kullanmaya başlamıştır.

13 Mart: Durumda bir değişiklik olmamıştır.



Şekil 17. F2 RCIC [11]

Şekil 18. F2 Buhar Üfleme Panelinin Açılması (11 Nisan, TEPCO tarafından)

14 Mart, 11:00: Buhar üfleme paneli düşmüştür. Bu panel, reaktör binasının üst kısmında birikebilecek fazla basıncı rahatlatmak için monte edilmiştir (Şekil 18). Panel, depremlerde ve ani şoklarda bazen düşebilmektedir. Bu nedenle, aynı anda F3'ün en üst katında meydana gelen hidrojen patlaması bu panelin düşmesine neden olmuş olabilir.

13:25: RCIC durmuştur. Nedeni bilinmemektedir. Bataryalar tükenmiş olabilir veya basınç rahatlatma havuzunun sıcaklığı limiti aşmış olabilir.

Sonuç olarak, korun yavaş yavaş bozulduğunu tahmin ediyoruz. Yakıt zarfı sıcaklığı 1200 °C'ye çıkmıştır ve zarf tüpünün üzerinde zirkonyum oksidasyonu başlamıştır. Tüpler daha sonra bozulmuş, yüksek sıcaklığa sahip yakıt tabletleri RPV'nin dibine çökmüştür. Aynı zamanda yüksek oranlarda hidrojen üretilmiştir.

16:34: SRV'ler açılmıştır. Reaktör basıncı 7Mpa'dan 0,5Mpa'ya düşmüştür.

Tam bu sırada deniz suyu enjeksiyonu yapılmış olabilir. Ancak böyle bir enjeksiyonun yapılmış olduğuna dair bilgiye sahip değiliz.

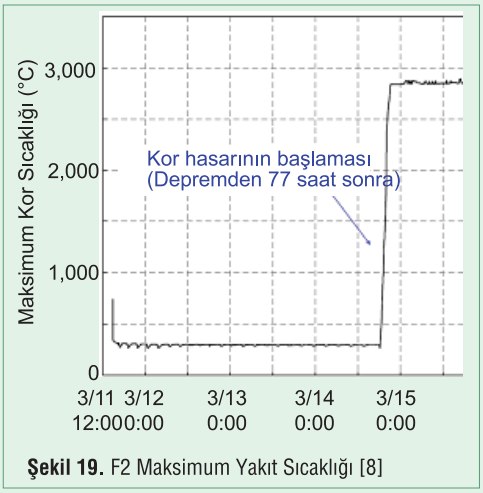
19:54: Deniz suyu enjeksiyonu doğrulanmıştır (yedi saat boyunca kor soğutması yapılmamıştır). RPV basıncı sonunda 16 Mart öncesinde sıfıra inmiştir. Bu durum, RPV'nin, dibindeki sıcak yakıta bağlı olarak, 14 ile 16 Mart arasında bir zaman kırıldığını göstermektedir.

3.2.2 PCV Havlandırması

PCV basıncı her zaman kırılır diskin kırılma noktasının altında bir değerde olduğundan (0,55Mpa), F2 hiçbir zaman PCV havalandırmasına sahip olmamıştır.

İki ay sonra TEPCO hesaplama sonuçlarını yansıtan bir rapor yayınlamıştır. RCIC'in durmasından sonra, 14 Mart gecesi, yakıt tabletlerinin %50'si 2800°C'ye ulaşmış ve RPV'nin dibine çökmüştür.

Bu sırada PCV bütünlüğünü koruyor olabilir; ancak, bir sonraki gün



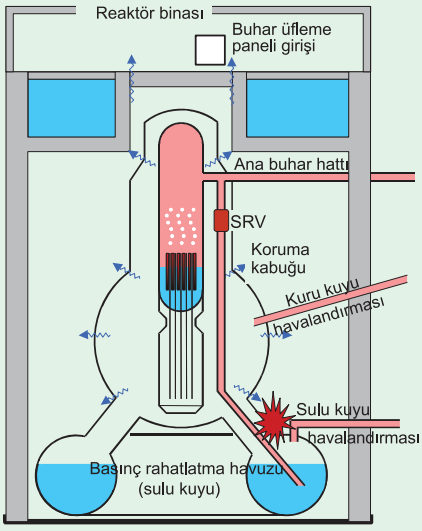
Şekil 19. F2 Maksimum Yakıt Sıcaklığı [8]

meydana gelen patlama PCV'yi kırmıştır.

3.2.3 F2 Hidrojen Patlaması

15 Mart, 06:10: Basınç rahatlatma havuzunda bir hidrojen patlaması meydana gelmiştir ve PCV'nin bütünlüğü bozulmuştur. Bu olay, ciddi miktardaki radyoaktif suyun türbin binasına sızmasına neden olmuştur (Bu olayla ilgili ayrıntılar daha sonra ele alınacaktır).

Gizemini koruyan konulardan biri patlamanın nerede olduğudur. F1 reaktör binasının en üst katında bir patlama olmuştur; ancak, F2 reaktöründe 14 Mart'ta üfleme paneli ejeksiyonu meydana gelmiştir. Panel, F1'de olan patlamanın aynısının burada olmasını engellemiştir, ama başka bir yerde farklı bir patlama daha meydana gelmiştir.



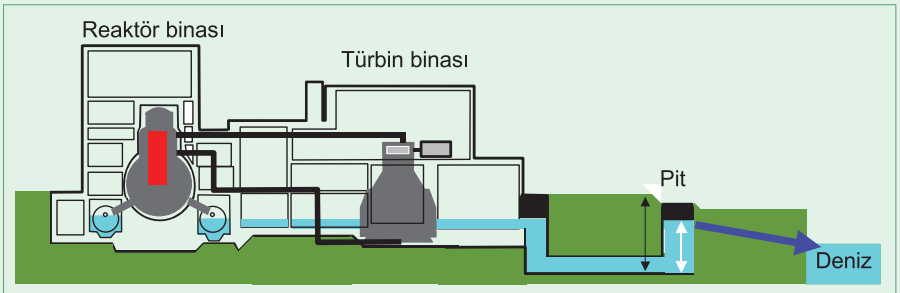
Şekil 20. F2 Hidrojen Patlaması

BWR'nin PCV'si asal gazla dolduğundan hidrojen patlamasının basınç rahatlatma havuzunun dışında meydana gelmiş olması muhtemeldir. Bu bölge, reaktör korundan gelen hidrojenin en fazla yoğunlaştığı bölgedir. Borularda ve flanşlarda her zaman küçük sızıntılar olmaktadır. Fazla basınç bu süreci hızlandırmış olabilir.

13 Nisan: 13 Nisan'da TEPCO, F2 türbin binasının suyundaki radyoaktivite ölçüm sonuçlarını yayınlamıştır. İyot 184°C'de, Sezyum 671°C'de, Baryum 1897°C'de ve Stronsiyum 1382°C'de buharlaşmaktadır. Baryumun buharlaşma sıcaklığı çok yüksek olmasına rağmen, bir dakikalık yarı ömür süresiyle Sezyum ve Ksenon'un bozulması sonucunda oluşmaktadır. Bu nedenle maksimum yakıt sıcaklığını belirlemede kararlı elementin stronsiyum olması muhtemeldir.

Tablo 2. F2 Türbin Binasının Suyundaki Radyoaktivite

Nüklitler	milyon Bq/cc (13 Nisan)
İyot-131	2,00
Sezyum-134	2,60
Sezyum-137	2,80
Baryum-140 0,24	0,24
Stronsiyum-89	0,70
Stronsiyum-90	0,14



Şekil 22. "Pit"e Doğru Suyun İzlediği Yol

Şekil 21, ilk birkaç gün içerisinde F2'de gözlemlenen basınç ve su seviyeleriyle beraber olaylar örgüsünü sunmaktadır.

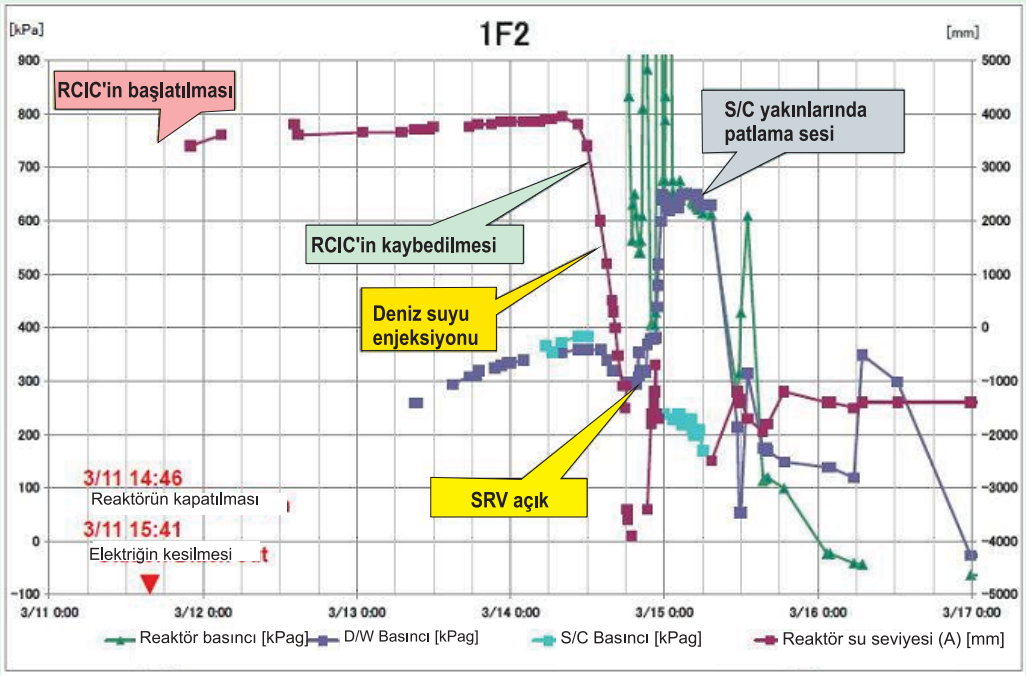
3.2.4 F2 Deniz Kirliliği

2 Nisan: F2'nin pitinden 2 metre uzaklıkta çok yüksek oranlarda radyasyon (400mSv/h) gözlenmiştir. Pit, türbin binası suyunun denize verildiği çıkıştır. F2, 11 Mart'ta kapatıldığında, tüm korda toplamda 4.2e18 Bq İyot-131 radyasyonu olduğu tahmininde bulunmuştuk. Bu iyot basınç bastırma havuzuna girmiş ve PCV kırılmış olduğundan, buradan türbin binasının zemin katına ulaşmıştır. Bu yüksek değer, Pitteki suyun kordaki suyla neredeyse aynı oranda radyasyona sahip olduğunu göstermekteydi.

TEPCO aynı zamanda F2'nin önündeki denizde İyot-131'e rastladığını ve değerinin 5,40-milyon

Bq/cc gibi yüksek bir değer olduğunu duyurmuştur. Binanın zemin katı su geçirmez olmadığı için, bir miktar sızıntı beklenmektedir. Bu veriler deniz kirliliğinin başladığını göstermektedir. TEPCO şu anda denize bariyerler yerleştirmeye başlamıştır ve sızıntı azalmaktadır.

Uranyum ve Plütonyum gibi nükleer yakıt maddelerine su yüzeyinde rastlanmamıştır; ancak, RPV ve PCV



Şekil 21. 17 Mart'a Kadar 2.Birime Ait Veriler [4]

kırık olduğundan bu maddelerin suya karışması muhtemeldir. Aynı zamanda bu binaların altındaki toprak çoktan kirlenmiş olabilir.

3.2.5 F2 Kullanılmış Yakıt Havuzu

Şans eseri veya değil, ancak, F2 binasının çatısı zarar görmemiştir. Binanın içerisinde F2'nin kullanılmış yakıt havuzunun nerede olduğunu görememekteyiz. 11 Mart'tan itibaren kullanılmış yakıt soğutması yapılamamaktadır, ama 20 Mart'tan sonra deniz suyu enjeksiyonu yapılmıştır.

18 Nisan'da TEPCO, kullanılmış yakıt havuzundan aldığı sudaki radyasyon ölçümlerini yayınlamıştır. İyot-131'in değeri sadece 0,004-milyon Bq/cc iken, Sezyum-134 'ün değeri 0,16-milyon Bq/cc ve Sezyum-137'nin değeri ise 0,15-milyon Bq/cc'dir.

Kor içerisindeki İyot-131'in oranı çok yüksek olduğundan, küçük sayılabilecek oranın üzerinde bir I-131 değeri, saptanan radyoaktivitenin, daha önce hasar görmüş olabilecek kullanılmış yakıttan kaynaklandığını göstermektedir. Kullanılmış yakıttaki bu hasarın nedeni bilinmemektedir. Kullanılmış yakıtın bozulma ısısı küçük olduğundan kuruması muhtemel değildir.

3.2.6 F2 Sonuç

Vardığımız sonuca göre Fukushima-2 "yarı erime" durumundadır. Yani yakıt tabletleri 1400 °C'yi bulmuş veya bu değerin üzerine çıkmış, ancak 2800°C'nin altında kalmıştır. Sıcak yakıt RPV'nin dibine çökmüş ve burada delikler açarak PCV'nin dibine kadar ilerlemiştir. PCV'nin kırılmasına Hidrojen patlamasının neden olduğunu tahmin ediyoruz. Elbette ki, F1'de olduğu gibi, PCV'nin dibine çöken sıcak yakıtın da bu kırılmaya neden olmuş olabileceği fikrini tamamen reddetmiyoruz. Öte yandan, kullanılmış yakıt havuzundaki yakıtlar hasar görmüştür; ancak nedeni bilinmemektedir.

{DEVAM EDECEK}

KAYNAKÇA (1. Bölüm için)

1. "In Europe and China, Japan's Crisis Renews Fears About Nuclear Power"[Japonya Krizi Avrupa ve Çin'de Nükleer Güçle İlgili Kaygıları Yeniliyor], J. Dempsey, S. LaFraniere, 16 Mart, 2011, The New York Times, Alındığı yer: (http://www.nytimes.com/2011/03/17/business/global/17atomic.html)
2. "Fukushima Nuclear Power Station 1, Tsunami Investigation Results" [Fukushima Nükleer Santrali 1, Tsunami Araştırma Sonuçları], Alındığı tarih: 9 Nisan, 2011, TEPCO Basın Bildirisi, Japonca, Alındığı yer: (http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu11_j/images/110409a.pdf). İngilizce hali "Fukushima Accident: An overview"[Fukushima Kazası: Genel Bakış], A. Omoto, 27 Haziran 2011, Japon Atom Enerjisi Komisyonu, Alındığı yer: (http://www.aec.go.jp/jicst/NC/about/kettei/110627.pdf).
3. "Boiling Water Reactor Systems" [Kaynar Su Reaktör Sistemleri] US-NRC, Alındığı yer: (http://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/teachers/03.pdf)
4. "The 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Pacific Earthquake and the Seismic Damage to the NPPs"[Pasifik Açıklarında Meydana Gelen 2011 Tohoku Pasifik Depremi ve Nükleer Santrallere Verdiği Sismik Hasarlar], Nuclear and Industrial Safety Agency [Nükleer ve Endüstriyel Güvenlik Kurumu], 4 Nisan, 2011.
5. "Post Irradiation Examinations of FMDP ATR MOX Fuel"[FMDP ATR MOX Yakıtının Radyasyon Yayılımı Sonrası İncelenmesi], R.N. Morris, C.A. Baldwin, N.H. Packan, Oak Ridge National Laboratory [Oak Ridge Ulusal Laboratuarı], 2001, Alındığı yer: (http://www.ornl.gov/~webworks/cppr/y2001/pres/114819.pdf)
6. "Identification and Assessment of BWR In-vessel Severe Accident Mitigation Strategies" [BWR Kazan İçi Ciddi Kaza Olaylarını Hafifletme Stratejilerinin Belirlenmesi ve Değelendirilmesi], Oak Ridge National Laboratory [Oak Ridge Ulusal Laboratuarı], 1992.
7. "U.S. Sees Array of New Threats at Japan's Nuclear Plant"[ABD, Japonya Nükleer Santralinde Yeni Tehditler Tespit Ediyor], New York Times, 6 Nisan, 2011, Alındığı yer: (http://www.nytimes.com/2011/04/06/world/asia/06nuclear.html?pagewanted=all)
8. "Fukushima-dai-ichi Nuclear Power Stations, Analysis and Evaluation of Operation Records and Accident Records on Tohoku Pacific Earthquake"[Fukushima-dai-ichi Nükleer Santralleri, Tohoku Pasifik Depremi Konusunda Hazırlanan Operasyon Kayıtları ve Kaza Raporlarının İncelenmesi ve Değerlendirilmesi], Japonca, TEPCO, 5/23/2011, Alındığı yer: (http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu11_j/images/110524a.pdf)
9. "Influence and Current Status of Nuclear Power Stations at North-Japan Earthquake and Disaster" [Nükleer Santrallerin Kuzey Japonya Deprem ve Felaketindeki Etkileri ve Bugünkü Durumları], TEPCO, Mayıs 2011, Alındığı yer: (http://www.pref.niigata.lg.jp/HTML_Article/245/310/110519_H23-1-No.1,0.pdf)
10. "NUREG-1150: Severe Accident Risks: An Assessment for Five U.S. Nuclear Power Plants" [NUREG-1150: Ciddi Kaza Riskleri: ABD'nin 5 Nükleer Santrali Üzerine Bir İnceleme] , US-NRC, 1990.
11. "Boiling Water Reactor GE BWR/4, Technology Advanced Manual" [Kaynar Su Reaktörü GE BWR/4, İleri Teknoloji Klavuzu] , US-NRC, Alındığı yer: (http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0230/ML023010606.pdf)■