TEKNİK RAPOR: FUKUSHIMA KAZA ÖZETİ - II. BÖLÜM

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. 625.sayımızda yayınladığımız birinci bölümde; gerçekleşen deprem ve tsunami hakkında bilgiler, Fukushima-1 ve Fukushima-2 reaktörlerindeki olaylar örgüsü yer almıştı. Okumakta olduğunuz ikinci bölümde ise Fukushima-3, Fukushima-4 ve Fukushima-5 ve 6 reaktörlerinde gerçekleşen olaylar ile raporun sonuç bölümü yer almaktadır.

Yazarların sonuç bölümünde de 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.

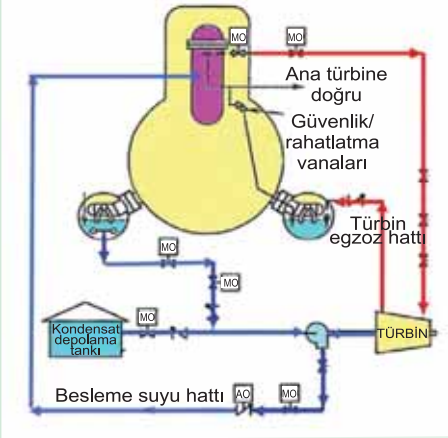
Deprem ve tsunami, Tokyo Elektrik Enerjisi Anonim Şirketi (TEPCO) tarafından işletilen 1 Numaralı Fukushima Nükleer Enerji Santrali'nin Kaynar Su Reaktörlerinin (Boiling Water Reactors: BWR) 6 biriminde beklenmedik kazalara yol açmıştır. Basılı bilgilere dayanan bu rapor, kazaların nedenlerini ve süreçlerini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

3.3 Fukushima-3 Reaktörü

3.3.1 F3 Erime Süreci

11 Mart, 15:05: F3 Reaktör Kor İzolasyon Soğutma Sistemi (RCIC), F2'ninkiyle aynı durumdadır (Şekil 17). RCIC, F3'ü ilk elektrik kesilmesi (SBO: Station Black-Out) aşamasında kurtarmıştır, ama tsunami deniz suyu soğutma sistemini çökerttiğinden, basınç rahatlatma havuzunda biriken ısı ortadan kaldırılamamıştır.

15:25: RCIC yüksek su seviyesi sinyali tarafından durdurulmuştur. Bu durum RCIC'in gereken suyu kora enjekte etmiş olduğunu göstermektedir.



Şekil 17. F2 RCIC [11] (Bölüm 3.2.1)

15:38: Operatör, santralde elektriğin kesildiğini (SBO) rapor etmiştir. Dizel Jeneratörler (DG) durmuştur.

16:03: RCIC manuel olarak yeniden başlatılmıştır.

12 Mart, 11:36: RCIC durdurulmuştur. Nedeni bilinmemektedir.

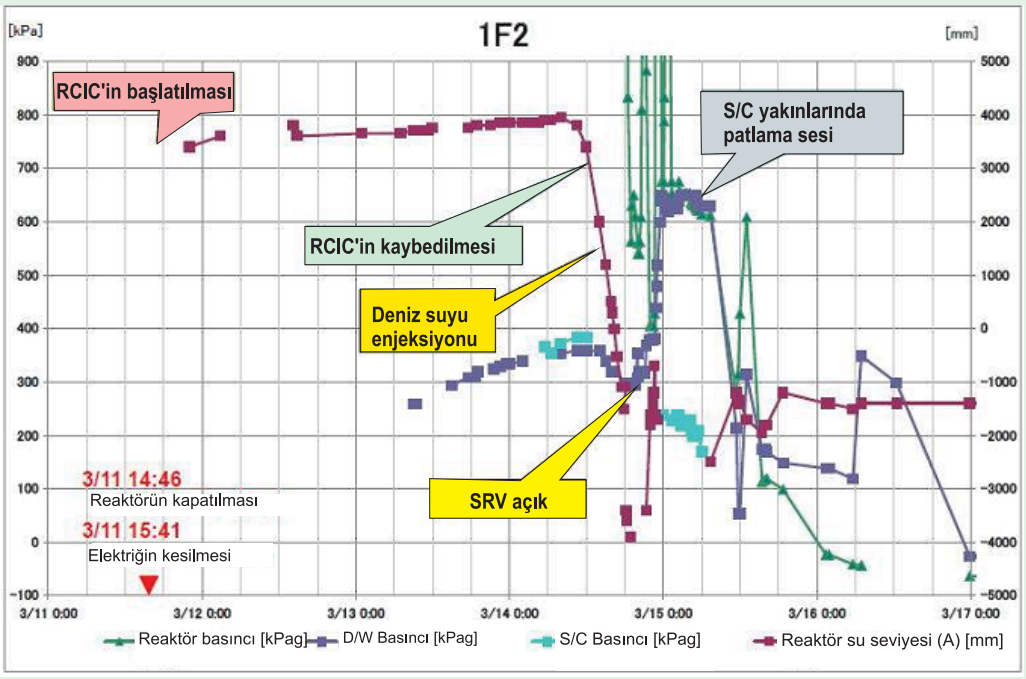
12:35: Yüksek Basınç Soğutma Suyu Enjeksiyon Sistemi (HPCI: High Pressure Coolant Injection System) düşük su seviyesi sinyali dolayısıyla otomatik olarak başlatılmıştır. HPCI, Acil Kor Soğutma Sistemlerinden (ECCS: Emergency Core Cooling Systems) biridir ve Şekil 21'de gösterilen RCIC ile neredeyse aynı konfigürasyona sahiptir. Her ikisi de buhar türbiniyle çalışmaktadır.

---

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

[2] ***Ritsuo Yoshioka:*** *Japonya İşlevsel Güvenlik Laboratuvarı (Japan Functional Safety Laboratory) 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 Iino: *SYDROSE LP komandite ortağı. Tokyo Üniversitesi'nden Mühendislik Yüksek Lisans 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.*



Şekil 21. 17 Mart'a Kadar 2.Birime Ait Veriler [4] (Bölüm 3.2.3)

Aynı zamanda, Reaktör Basınç Kazanı'ndaki (RPV: Reactor Pressure Vessel) ve Birincil Koruma Kazanı'ndaki (PCV: Primary Containment Vessel) basınç azalmıştır. Bu durum HPCI borusunun deprem anında kırıldığını göstermektedir. Ancak, 4 ay sonra TEPCO, bakım ekibinin HPCI odasına girdiğini ve HPCI'da sızıntı tespit etmediklerini bildirmiştir. Böylece, basınçtaki düşüşün akımdaki dalgalanmalar dolayısıyla olduğu tespit edilmiştir.

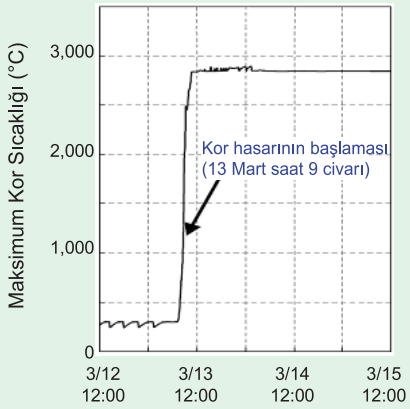
13 Mart, 02:42: RPV basıncı düşmüştür ve HPCI durmuştur. Kontrol sistemi bataryaları yorulmuştur. HPCI'nın durmasının kor bozulmasını tetiklediğini var saymaktayız. Yakıt zarfı sıcaklığı 1200 °C'ye yükselmiştir ve zarf tüpünün zirkonyum oksitlenmesi başlamıştır. Yakıt zarfı tüpü bozulmuş, yüksek sıcaklığa sahip yakıt tabletleri RPV'nin dibine çökmüştür. Aynı zamanda, yüksek oranlarda hidrojen üretilmiştir.

3.3.2 F3 PCV Havalandırması

13 Mart, 09:00: PCV basıncı 0,6MPa'ya ulaşmıştır. PCV havalandırmasının kırılır diski 0,55Mpa'da kırılacak şekilde dizayn edildiğinden PCV havalandırması bu noktada olanaklı hâle gelmiştir.

09:10: Güvenlik Rahatlatma Vanaları (SRV: Safety-Relief Valve) açılmıştır ve PCV sulu havalandırması çalışmaya başlamıştır. PCV havalandırması mümkün olan ilk anda çalışmaya başladığından F3'ün havalandırmasında gecikme olmamıştır.

10:00: Temiz su enjekte edilmiştir. (7 saat boyunca kor soğutması yapılamamıştır).



Şekil 23. F3 Maksimum Yakıt Sıcaklığı [8]

12:00: Deniz suyu enjekte edilmiştir.

13:17: Reaktör binasının 1. katında yüksek oranda radyasyon tespit edilmiştir. Bu durum ciddi oranda yakıt arızası olduğunu göstermektedir.

İki ay sonra, TEPCO ölçüm sonuçlarını bildiren bir rapor yayınlamıştır. HPCI durduktan sonra, 13 Mart sabahında, yakıt tabletlerinin %50 ile %100'ü 2800°C'ye ulaşmıştır ve RPV'nin dibine çökmüştür.

19 Mart'a kadar hem RPV hem de PCV bütünlüklerini korumuşlardır. En azından RPV/PCV'de büyük delikler oluşmamıştır; çünkü her iki basınç değeri de düşük olmasına rağmen pozitif bir değerdeydi. Sonuç için 3.3.8 (20 Mart'ta F3'teki ani basınç artışına bağlı olarak Tokyo bölgesinde tehlikeli noktaların ortaya çıkışı) bölümüne bakınız.

3.3.3 F3 Hidrojen patlaması

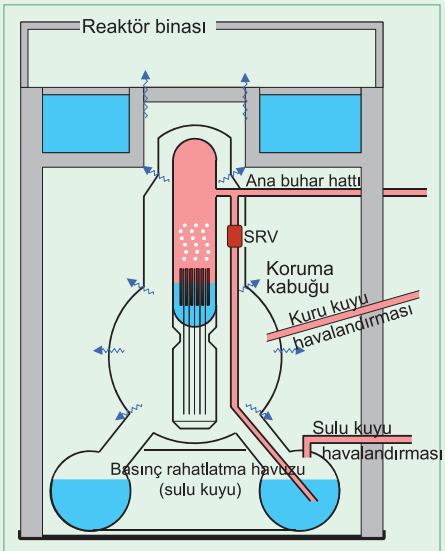
14 Mart, 06:10: PCV basıncı 0,5Mpa'ya ulaşmıştır.

11:01: F3 reaktör binasının en üst katında bir patlama meydana gelmiştir (Şekil 24). Yan duvarlardaki ve çatıdaki beton ve çelik paneller, reaktör binası içerisindeki buhar

Şekil 24. F3'teki Hidrojen Patlaması [4] (Bacalar 120 m yüksekliğindedir)

Şekil 25. En Üst Kat (5. kat) ve 4. Katın Duvarlarının Hasar Görmesi (11 Nisan, TEPCO tarafından yayınlanmıştır)

hattının kırılması gibi aşırı basıncın ortaya çıktığı durumlarında kırılacak şekilde dizayn edilmiştir. Bu nedenle tasarımlarına uygun olarak kırılmışlardır (Şekil 25); ancak öncesinde bir hidrojen patlaması olacağı



Şekil 14. Hidrojen Sızıntısının Yönü (Bölüm 3.1.3)

muhtemelen tahmin edilmemiştir.

Duman 300 metre yüksekliğe ulaşmıştır ve patlama F1'de olandan daha büyüktür. F3'teki çelik çatılar hasar görmüştür, ancak, bu durum F1'de görülmemiştir. F3'teki yakıt çizelgesinin daha geniş olmasından dolayı burada F1'de olduğundan daha fazla hidrojen üretilmiş olabilir. Patlama olduğunda yazarlardan biri olan Yoshioka bir televizyon stüdyosundaydı ve haberlere şaşırmıştı.

PCV havalandırması patlamadan 26 saat önce yapılmıştır, ancak hidrojen gazını patlamadan yok edebilecek kadar verimli olamamıştır. Bunun olası bir nedeni, çoğunlukla buharı yok eden ve hidrojen gazını kuru kuyuya yönlendiren sulu kuyu havalandırmasıdır. Daha sonra hidrojen kuru kuyudan çıkarak reaktör binasına sızmıştır. İzlediği yol, F1'le aynıdır (Şekil 14).

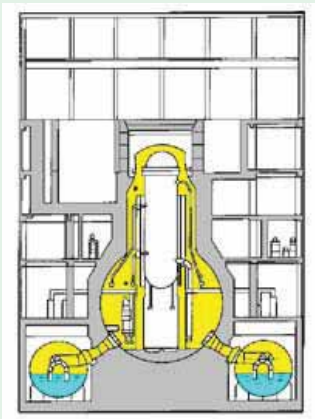
3.3.4 F3 MOX Yakıt Riski

F3 koru, ilk fisil (bölünebilir) madde olarak plütonyum içeren 32 Karma Oksit (MOX: Mixed Oxide) yakıt demeti içermekteydi. Elbette, UO_2 yakıtı korda kullanıldığı zaman plütonyum üretmekteydi. Örneğin, F3'teki toplam plütonyum miktarı 1 ton, F2'deki ise 0,5 tondu. F4'ün kullanılmış yakıt havuzundaki 2 tonluk toplam plütonyum, tüm korlar ve Fukushima tesisindeki tüm havuzlar arasında miktarı en fazla olandı. Yani plütonyum riski sadece F3 için geçerli bir durum değildir.

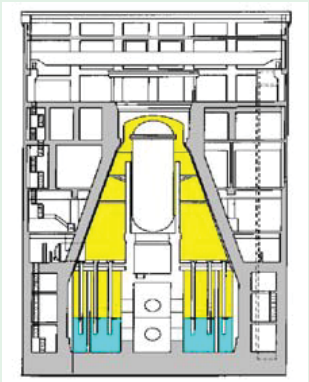
3.3.5 PCV Dizaynının Etkisi

Mark-I PCV'nin hacminin Mark-II'ye oranla göreceli olarak daha küçük olduğu söylenmektedir (Şekil 26). Eğer reaktör çıktısı başına PCV hacmi karşılaştırılırsa neredeyse aynıdırlar (Şekil 27). Mark-I PCV küçük olsa da Fukushima kazasının nedeni bu değildi. Asıl neden, deprem ve tsunami yüzünden santralin elektriğinin kesilmesi ve deniz suyu soğutma sisteminin kaybedilmiş olmasıydı.

Fukushima'daki en büyük felaket, çoğunlukla havalandırmadan kaynaklanan ve hidrojen patlamalarıyla da tetiklenen büyük miktarlardaki radyoaktivite salınımıdır. PCV'nin hacmi daha büyük olsaydı daha fazla miktarda buharı bir süreliğine tutabilirdi, ancak er ya da geç TEPCO, havalandırmayı çalıştırmak ve ciddi oranlarda radyoaktiviteyi salmak zorunda kalacaktı. Aynı zamanda, hidrojen PCV'nin dışında patlamıştır.

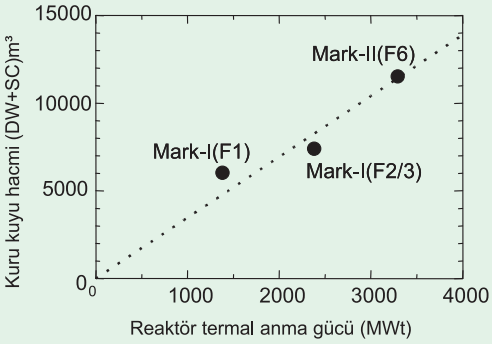


(a) Mark-I (F1/2/3/4/5)



(b) Mark-II PCV (F6)

Şekil 26. Mark-I ve Mark-II PCV (F6) [12]



Şekil 27. PCV Hacmine Karşılık Reaktör Gücü ([8] ve [13] nolu kaynakçalardaki verilere dayalı olarak hesaplanmıştır)

Bu açıdan, Mark-I'in hacmi küçük olsa da Fukushima felaketine katkısının az olacağını söyleyebiliriz.

3.3.6 F3 Sudaki radyoaktivitenin ölçümü

14 Nisan'da TEPCO F3 türbin binasının zemin katındaki suyun radyoaktivite ölçüm sonuçlarını yayınlamıştır (Tablo 3).

Parantez içerisindeki rakamlar F3'ün F2'ye oranını bildirmektedir. Stronsiyum bir beta yayıcıdır ve doğru olarak ölçülmesi zordur. Bu nedenle, ölçümler bir miktar hata içerebilmektedir.

F3 reaktör binasındaki yüksek radyasyon seviyesi (Bkz. Bölüm 3.3.2, 13 Mart, 13:17) bu radyoaktif izotopların F3 korundan geldiğini göstermektedir. Bu arada, bu oranlar neredeyse aynı olduğundan radyoaktif suyun F2 türbin binasından geldiği düşünülebilir.

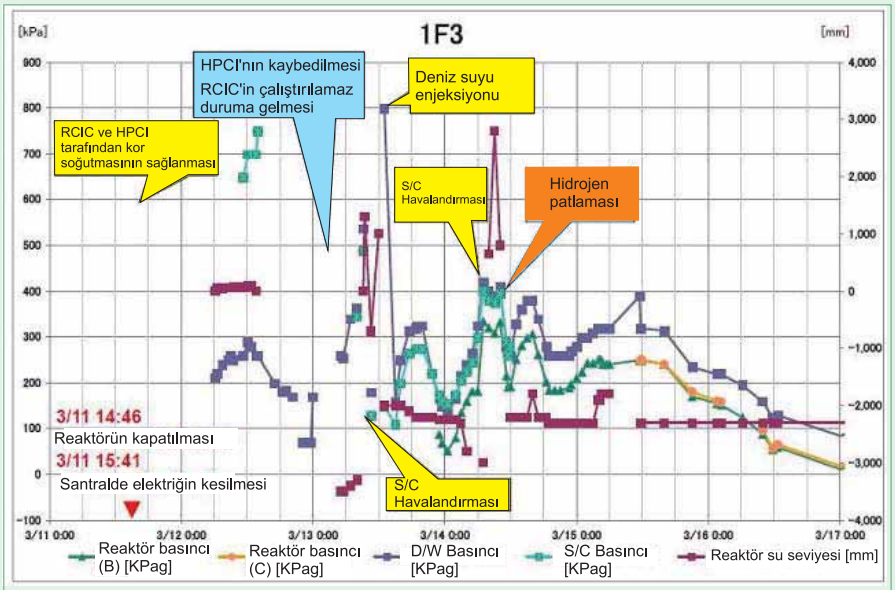
Tablo 3. F3 Türbin Binası Suyundaki Radyoaktivite

Nüklitler	milyon Bq/cc 14 Nisan
İyot-131	0,16 (%8)
Sezyum-134	0,14 (%5)
Sezyum-137	0,16 (%6)
Baryum-140	0,015 (%6)
Stronsiyum-89	0,086 (%12)
Stronsiyum-90	0,015 (%11)

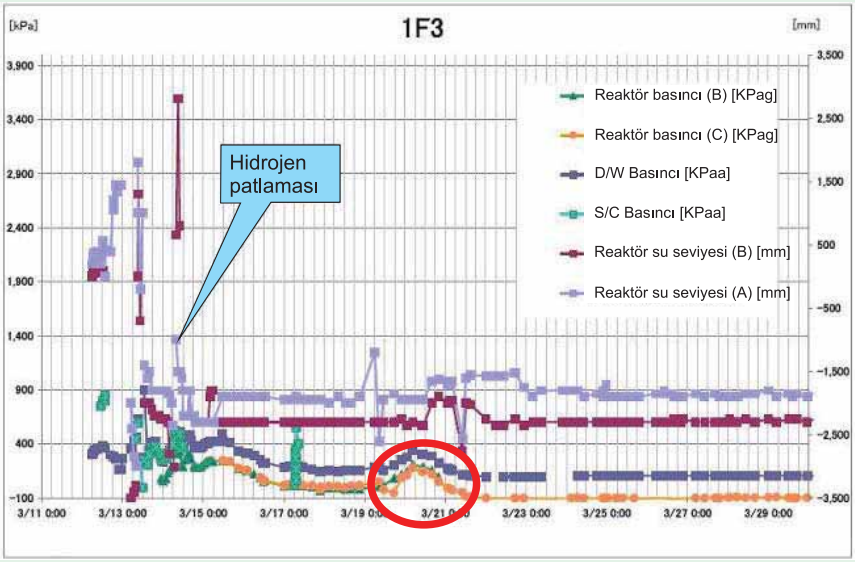
3.3.7 20 Mart'ta F3'teki ani basınç artışına bağlı olarak Tokyo bölgesinde tehlikeli noktaların ortaya çıkışı

Şekil 28 ve 29 ilk birkaç gün için F3'teki olaylar örgüsüyle birlikte basınç ve su seviyelerini göstermektedir. Şekil 30 ise, RPV ve Şekil 29'da kırmızı daire içerisinde gösterilen kuru kuyu basınç trendini göstermektedir.

Hem RPV hem de PCV'nin bütünlüklerini korumuş olmaları muhtemeldir ya da her iki basınç değerinin de düşük; ancak pozitif bir değer olduğu düşünülürse, en azından 19 Mart'a kadar RPV/PCV içerisinde büyük delikler bulunmadığı düşünülebilir. Ancak 20 Mart'ta RPV ve PCV'nin her ikisinde de ani basınç yükselmeleri görmekteyiz. Bunu 21 Mart'ta basıncın sıfıra düşmesi takip etmiştir. Basınçtaki bu yükselme ve düşme bir deliğin önce kapandığını sonra açıldığını göstermektedir.

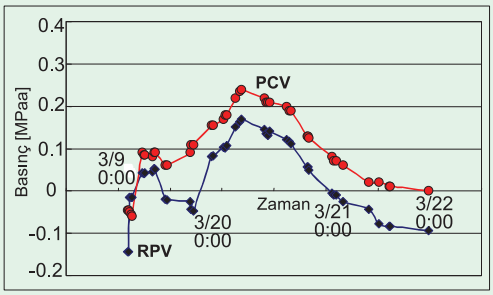


Şekil 28. 17 Mart'a Kadar F3'ün Verileri [4]

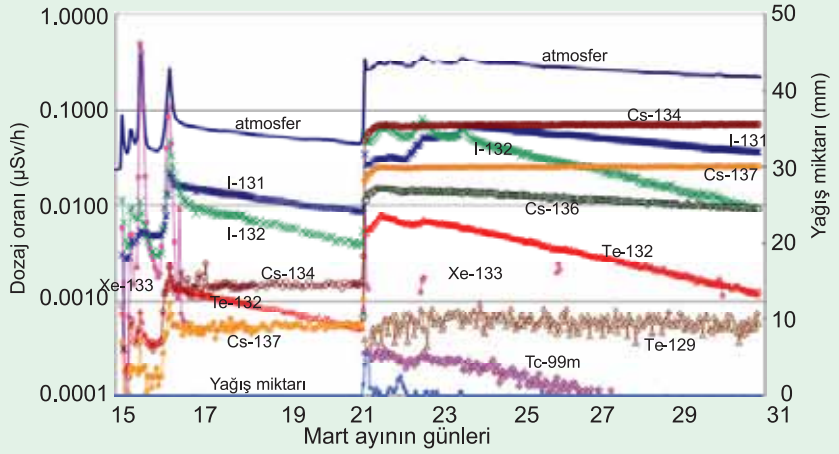


Şekil 29. 30 Mart'a Kadar F3'ün Verileri [4]

Bu arada, 20 Mart'ta Tokyo'ya güney yönünden esen rüzgârla beraber bir miktar yağmur yağmıştır. Üç ay sonra Tokyo, Chiba ve Saitama kentlerinde, Fukushima santralinden 200 km uzaklıkta "tehlikeli noktalar" diye adlandırılan bölgeler ortaya çıkmıştır. Bu bölgelerdeki radyasyon seviyeleri 0,4-0,5 mikro-Sv/h olarak, yani normal radyasyon seviyelerinin 4-5 kat üzerinde bir değerde belirlenmiştir. Bu radyasyon seviyeleri insan sağlığı açısından kritik olmasa da, beklenmedik bu olay vatandaşlar arasında kaygıya neden olmuştur.



Şekil 30. F3'te RPV ve PCV İçerisindeki Basınç



Şekil 31. 15-31 Mart Arasında Chiba Kentindeki Radyasyon Seviyesi [14]

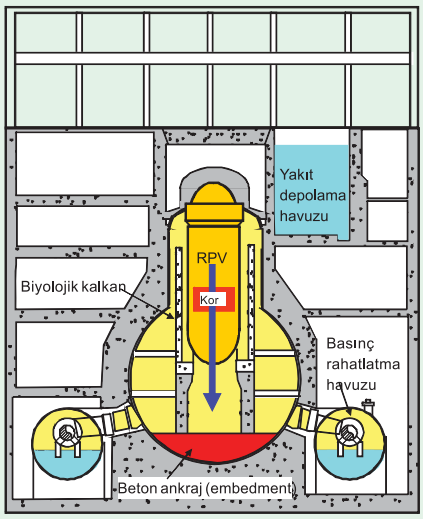
Şekil 31, 15-31 Mart arasında Chiba kentindeki değişik radyoaktif bileşenlerin radyasyon sevisindeki değişimleri göstermektedir. Şekle göre 20 Mart öncesinde ve 21 Mart sonrasında hafif farklılıklar vardır. Ne TEPCO ne de hükümet bu olağan dışı durumu açıklamıştır ve nedeni şu noktada belirsizliğini korumaktadır.

Tahminimize göre bütünlüğü bozulmuş olan yakıt, damlamış ve küçük delikleri tıkayarak 20 Mart'ta RPV/PCV'deki basıncın yükselmesine neden olmuştur. Daha sonra 21 Mart'ta delikler büyümüştür. Bu olaylar yavaş ilerlediğinden, kritik bir kaza ya da bir patlama olduğunu düşünmüyoruz. Sorun, 21 Mart itibarıyla PCV'nin bütünlüğünün tamamen buzulmuş olmasıydı. 21 Mart günü saat 16:00 ve 18:00 arasında kullanılmış yakıt bölümünden kara dumanlar yükselmiştir (Şekil 32). Aynı zamanda F3'ün 1 km kuzeyindeki radyasyon seviyesi saat 17:40 itibarıyla 494-mikro-Sv/h iken 18:30'da 1932'ye yükselmiş ve 20:30'da 442'ye düşmüştür.

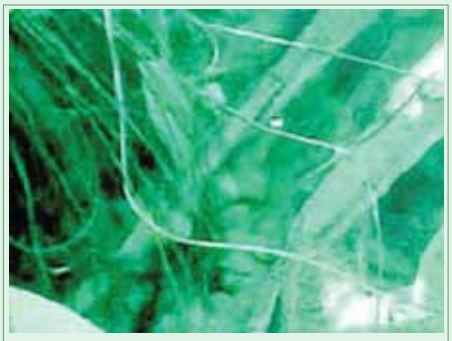
Şekil 32. 21 Mart'ta F3'teki Duman (TEPCO)

Tahminlerimize göre radyoaktif madde bu sırada dumanla birlikte dışarı çıkmıştır. Kara duman, kablo yalıtıcısı gibi bir organik maddeden kaynaklanan karbon gazının göstergesiydi. RPV'nin altında, rod tahrik mekanizmalarını ve nötron detektörlerini kumanda etmek için çok sayıda kablo bulunmaktadır (Şekil 33). 3.1.1 bölümünde de açıkladığımız gibi kızgın yakıt, kılavuz kanalını delmiş ve RPV'nin dibine kadar ilerlemiştir. Bu esnada kabloları yakmış olması muhtemeldir.

Şekil 33. ABWR RPV'nin Altı [15]



Şekil 34 MARK-I PCV [16]
(PCV Beton Zemini Kırmızı Renkte Gösterilmiştir)



Şekil 35. F3 Kullanılmış Yakıt Havuzu (8 Mayıs, TEPCO)

Fransız Ulusal Laboratuvarının görüşüne göre, bu kara dumanın nedeni "kor-beton kimyasal reaksiyonu"ydu. Elbette, kızgın yakıt Şekil 34'te gösterildiği gibi PCV'nin beton zeminine, çökmüştür. Ancak, bir Japon laboratuvarının açıklamalarına göre Japonya'daki santraller beton ve karbonu birlikte kullanmamaktadır; böylelikle, bu reaksiyon oluşmayacaktır. Bu durumda, bu kara duman büyük olasılıkla üzerlerine kızgın yakıt dökülen kabloların yanması sonucu oluşmuştur.

3.3.8 Plütonyumun tespiti [17]

21 Mart saat 13:30'da Fukushima santrali toprağında aşağıdaki plütonyum izotopları tespit edilmiştir. Bu plütonyumun F3'teki olaydan kaynaklı olarak ortaya çıkıp çıkmadığı bilinmemektedir, çünkü 20 Mart öncesine ilişkin veri bulunmamaktadır.

Pu-238: (5,4±0,62)×10-1 Bq/Kg-toprak

Pu-239, Pu-240: (2,7±0,42)×10-1 Bq/Kg-toprak

3.3.9 F3 Kullanılmış yakıt havuzu

14 Mart'ta meydana gelen hidrojen patlaması, kullanılmış yakıt havuzundaki beton panelleri ve çelik rebarları düşürmüştür. Yakıt demetlerinin zarar görüp görmediğini bilememekteyiz (Şekil 35).

Kullanılmış yakıt soğutma fonksiyonunu 11 Mart'ta kaybetmiştir, ancak 13 Mart'tan sonra deniz suyu enjekte edilmiştir. F3 kullanılmış yakıt havuzunun bozulma ısısı yüksek değildir ve soğutma görevini yerine getirdiğine inanmaktayız.

8 Mayıs'ta TEPCO, F3 kullanılmış yakıt havuzunun suyundaki radyoaktivite ölçümlerini yayınlamıştır. I-131 oranı 0.011-milyon Bq/cc (11 Mart tarihinde yaklaşık 2-milyon Bq/cc), Sezyum-134 oranı 0,14-milyon Bq/cc ve Sezyum-137 oranı ise 0,15-milyon Bq/cc olarak bulunmuştur. Kullanılmış yakıt havuzunda temelde İyot-131 bulunmadığından, ölçülen bu radyoaktivite 13 Mart'ta hasar gören F3 kor yakıtından kaynaklanmış olmalıdır. Elbette bu durum F3'teki kullanılmış yakıtın zarar görmediğini garantilememektedir.

3.3.10 F3 Sonuç

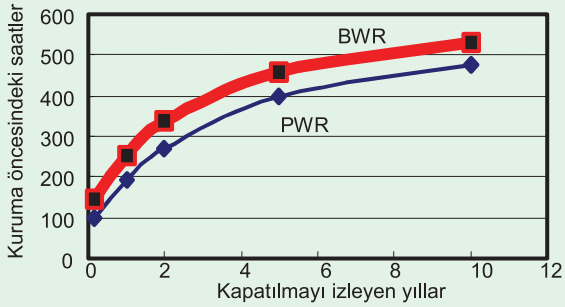
Bulgularımıza göre F3 "yarı erime" sürecindedir; yani yakıt tabletleri 1400°C'ye ulaşmış; ancak 2800°C'nin altında kalmıştır. Kızgın yakıt RPV'nin dibine çökmüş, burada delikler açmış ve buradan PCV'nin dibine kadar ilerlemiştir.

Tahminlerimize göre PCV'nin bütünlüğü 21 Mart'taki ani basınç artışı dolayısıyla bozulmuştur. Ancak, F1'de olduğu gibi, PCV'nin dibine çöken kızgın yakıtın da ona hasar vermiş olabileceği ihtimalini reddetmiyoruz. Kullanılmış yakıtın durumu ise belirsizdir.

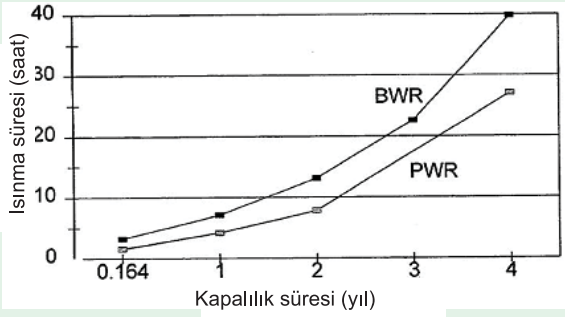
3.4 Fukushima-4 Reaktörü

11 Mart günü deprem ve tsunami meydana geldiğinde Fukushima Birim 4 (F4) periyodik kapatma dönemindeydi ve Reaktör Basınç Kazanında (RPV) bakım yapılacağı için kordaki tüm yakıt demetleri kullanılmış yakıt havuzuna taşınmıştı. Bu sırada kullanılmış yakıtın toplamda 1.331 yakıt demeti bulunmaktaydı. Bunların 548'i yüksek bozulma ısısına sahiptiler.

11 Mart günü saat 15:41'de deprem ve tsunami santralde elektrik kesintisine neden olmuştur (SBO) ve kullanılmış yakıtın soğutma pompaları çalıştırılamamıştır. Havuz suyu sıcaklığı yükselmeye başlamış ve havuzdaki su buharlaşmaya başlamıştır.

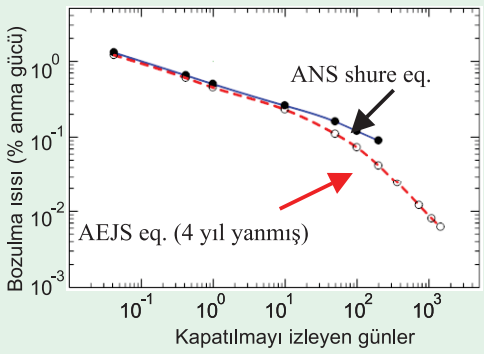


Şekil 37. Farklı Soğutma Sürelerine Göre Kurumanın Ortaya Çıkışı (saat bazında) [22]



Şekil 38. Havayla Soğutulan Yakıtın 900°C'ye Ulaşması İçin Gereken Saat [22]

Şekil 36 Amerikan Nükleer Enerji Kurumu (ANS)'nun kullandığı Shure tarafından aktarılan bozulma ısısı eğrilerini [18] ve bundan çok küçük bir sapma gösteren Japon Atom Enerjisi Kurumu (AESJ) tarafından bildirilen eğriyi [19] göstermektedir. 548 yakıt demetinden üretilen 2.381MWth'lik termal anma gücü [20], yakıt demeti başına termal anma gücünün 4.345kWth olduğunu göstermektedir. F4, 30 Kasım 2010 tarihinde periyodik bakım için kapatılmıştır [21]. Şekil 36, 101 günlük kapama sürecinin ardından deprem anında 0,1'lik bozulma ısısı ihtiyatlı tahminini göstermektedir. Yakıt havuzundaki yakıt demetleri düşük bozulma ısısına sahiptirler, ancak ne kadar süredir orada bulunduklarını bilmediğimizden 1.331 yakıt demetinden üretilen bozulma ısısını ihtiyatlı olarak toplamda 5.783kW şeklinde tahmin etmekteyiz. Öte yandan, 0,6275kWhr değerindeki ısı 1 kg suyu 100 °C'de buharlaştırmaktadır. Böylelikle, 1 gün içerisinde yakıt havuzundan 221 ton su buharlaşmaktadır (yani ayın 11'i ile 15'i arasındaki dört günde buharlaşan suyun miktarı yaklaşık 900 tondur). F4 havuzu sadece 1.300 ton suya sahiptir ve kullanılmış yakıtın kurumasına bozulma ısısı neden olmuş olabilir.



Şekil 36. Kapatılma Sonrası Bozulma Isısı [18,19]

Kullanılmış yakıt havuzuyla ilgili pek çok risk bulunmaktadır; ancak bunlar Japonya'da tam olarak bilinmemektedir. US-NRC'ye ait bir belge [22] havuz soğutmasının kaybedilmesinden sonraki saatleri anlatmaktadır. Şekil 37, eğer en son iki ay öncesinde kullanılmış yakıt yüklemesi yapılmışsa, BWR kullanılmış yakıtının bir hafta içerisinde kurumaya başlayacağını göstermektedir. Kuruma başlayınca yakıt sadece havayla soğutulabilir, ama Şekil 38'de gösterildiği gibi bu soğutma verimsiz olursa erime süreci beş saat içerisinde başlayabilir.

Daha önce sunmuş olduğumuz ihtiyatlı analize bağlı olarak F4 kullanılmış yakıt havuzundaki erimenin 15 Mayıs'ta başlamış olduğunu ve yakıtın 1200°C'ye çıkarak hidrojen gazı ürettiğini varsaymıştık. İyimser olarak değerlendirmek gerekirse, kullanılmış yakıtın hasar görmemiş olması muhtemeldir.

Şekil 39. F4 Reaktör Binası (22 Mart, TEPCO)

Şekil 40. F4 Reaktör binası (11 Nisan, TEPCO)

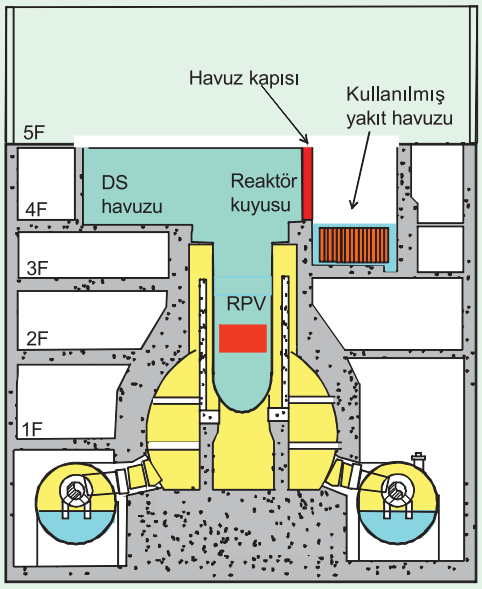
15 Mart günü saat 06:14'te F4 reaktör binasının en üst katında bir hidrojen patlaması meydana gelmiştir ve ilk haberlere göre kuzey batı duvarında büyük bir delik oluşmuştur. 09:38'de reaktör binasının 4. katında yangın çıkmıştır. Yangın çıkması bir çeşit organik maddenin yanmış olduğu anlamına gelmektedir. 22 Mart'a ait aşağıdaki fotoğraf 4. katta kare biçimli bir delik oluştuğunu göstermektedir (Şekil 39). Çizimde, 4. kattaki kırığın içerisinde bulunan iki adet MG (Motor-Generator) seti gösterilmektedir. Bu MG setleri reaktör soğutma pompalarını kontrol etmekte ve sıvı petrol kullanarak tork transferi yapmaktadır. Tahminlerimize göre, hidrojen patladığında, sızan petrol kullanılmış yakıt havuzundaki yüksek sıcaklığa bağlı olarak ateş almıştır.

15 Mart sabahı meydana gelen patlama ve yangın 4 ve 5. katların duvarları ile çatıyı yerle bir etmiştir. Yalnızca çelik çatı F3'ünkinden daha iyi bir durumdadır. F4'ün 11 Nisan'da çekilen fotoğrafı bu yapıyı göstermektedir (Şekil 40). Patlama ve yangının ortaya çıkması, kullanılmış yakıt sıcaklığının 1200°C'ye ulaştığını ve F1/F2/F3 korlarında da olduğu gibi hidrojen gazı üretildiğini göstermektedir.

16 Mart günü saat 05:45'de reaktör binasının 3. katında başka bir yangın daha çıkmıştır.

Kordaki tüm yakıt demetleri kullanılmış yakıt havuzuna taşındığından, havuz kapısı Şekil 41'de gösterildiği gibi kapanmıştır. Havuzdaki su seviyesi düşüp hidrojen patlaması meydana geldiğinde, bu havuz kapısı, Dryer-Seperator (DS) havuzundan ve reaktör kuyusundan gelen suyun kullanılmış yakıt havuzuna dolmasına olanak tanımak amacıyla yıkılmış olabilir. Yaklaşık 2000 ton su, kullanılmış yakıt havuzuna taşınarak birkaç gün daha kullanılmış yakıtın soğutulmasını sağlayabilmiştir.

29 Nisan'da TEPCO, F4 kullanılmış yakıt havuzunun bir fotoğrafını yayınlamıştır (Şekil 42). Şekil, her bir yakıt demetini ayrı şekilde tutan yakıt millerinin bozulmamış olduğunu göstermektedir. Ancak, kullanılmış yakıtların üst bağlantı plakalarını ve tutacaklarını görememekteyiz (kırmızı renkte gösterilmiştir). Öte yandan yeni



Şekil 41. Patlama Öncesi F4'deki Su Stoku [16] (Yazarların tahminine göre su seviyesi)

Şekil 42. F4 Kullanılmış Yakıt Havuzu (29 Nisan, TEPCO)

yakıtların tutacaklarını kolaylıkla görebilmekteyiz (sarı renkte gösterilmiştir). Tek başına bu fotoğraf kullanılmış yakıt demetlerinin sağlam olup olmadığını bize gösterememektedir; çünkü kullanılmış yakıtın üzerinde beton panel parçacıkları bulunmaktadır.

14 Nisan'da TEPCO F4 kullanılmış yakıt havuzu suyunun radyoaktivite ölçümlerini yayınlamıştır. Ölçümlere göre radyoaktivite oldukça düşüktür. İyot-131 oranı 220Bq/cc, Sezyum-134 88Bq/cc ve Sezyum-137 oranı ise 93Bq/cc olarak kaydedilmiştir. Bu ölçümler doğruysa F4 kullanılmış yakıtında neredeyse hiç arıza olmadığını söyleyebiliriz.

15 Mayıs'ta TEPCO F3'ten F4'e doğru yol alan hidrojen sızıntısının muhtemel yönünü açıklamıştır. 13 Mart'ta F3, PCV havalandırmasına tabi tutulurken hidrojenin ortak havalandırma borusu vasıtasıyla F4 reaktör binasına ulaşmış olabileceğini belirtmiştir. Ancak, bir sonraki gün TEPCO bu fikrini geri almıştır; çünkü iki reaktörün ara yüzeyindeki vanaların kapalı olduğu tespit edilmiştir.

Yukarıdaki çelişkili gözlemlere bakıldığında F4'te neler olduğunu anlamak zordur; ama muhtemelen yakıtta kuruma olmuştur ve bir arıza durumu söz konusudur.

3.5 Fukushima-5 ve 6 Reaktörleri

11 Mart günü deprem ve tsunami meydana geldiğinde F5 ve F6 periyodik kapatma aşamasındaydı ve her iki dış enerji hattı ve biri

Tablo 4. DG'lerin Bulunduğu Yerler [23]

Reaktör No	DG'nin Bulunduğu Yer
1	2: Türbin binası zemin katı
2	1: Türbin binası zemin katı 1: Kullanılmış yakıt ortak havuzu (hava soğutmalı)
3	2: Türbin binası zemin katı
4	1: Türbin binası zemin katı 1: Kullanılmış yakıt ortak havuzu (hava soğutmalı)
5	2: Türbin binası zemin katı
6	1: Türbin binası zemin katı 2: Reaktör binası zemin katı (1 hava soğutmalıdır)

dışındaki tüm Dizel Jeneratörler (DG) kullanılamaz hâle gelmişti. Kullanılmış yakıt ortak havuzu F4'ün 50 metre batısında bulunmaktaydı; ancak, zemin seviyesi Fukushima tesisleriyle aynıydı. Ortak havuz da tsunami nedeniyle hasar görmüştü ve buradaki DG'ler durmuştu. Bu durumun gerçek nedeni bildirilmemiştir, ancak tsunaminin burada etken olduğu düşünülmektedir.

Fukushima santralindeki toplam 13 DG'den sadece F6'da bulunan bir tanesi sağlam kalabilmiştir. Bunun nedeni reaktör binasında bulunması ve hava soğutmalı olmasıdır (Tablo 4). Bu DG, F5'i ve F6'yı kurtarmıştır. TEPCO geçici deniz suyu soğutma pompaları tesis etmiştir, çünkü orijinal sistemler tsunamiden zarar görmüştür.

4. SONUÇ

Ne yazık ki Fukushima kazası henüz sonuçlanmış değildir. Sonunda amaç tüm nükleer reaktörlerin tamamen kullanımdan kaldırılması olacaksa bunun yürürlüğe girmesi on yılları alacaktır. Bu nedenle, bu çalışmada sadece Fukushima kazasının doğrudan nedenleri ve süreçleri üzerinde durduk. Kazanın asıl nedenini ve arkaplanını ayrıntılı olarak araştırmamız gerekmektedir.

Fukushima F1/2/3/4 kazalarının sonuç özeti olarak, deprem ve tsunaminin santralde elektrik kesintisine neden olduğunu ve deniz suyu soğutma sistemlerinin yitirilmesine yol açtığını söyleyebiliriz. Böylece, kor soğutma ve kullanılmış yakıt havuzu soğutma fonksiyonları kaybedilmiştir. Acil soğutma sistemlerinin kazanın tesirini hafifletecek küçük katkıları olmuştur; ancak, bataryalar tükendiğinde bunlar da kaybedilmiştir. Bundan sonra yakıt, kuruma ve hasar süreçleriyle karşı karşıya kalmıştır ve hidrojen gazı açığa çıkmıştır.

Yakıt hasarının boyutlarını bilemiyoruz; ancak, tahminlerimize göre yakıt tabletleri yüksek sıcaklıktaki parçacıklar olarak dibe çökmüştür. İyimser bir tablo çizmek gerekirse, F1/2/3 korları ve belki F4 kullanılmış yakıt havuzundaki yakıt "yarı erime" sürecindeydiler; yani yakıt tabletleri 1400°C'yi veya üstünü görmüş, ancak 2800°C'yi geçmemiştir. Kızgın yakıt RPV'nin (Reaktör Basınç Kazanı) dibine çökmüş, burada delikler oluşturmuş ve sonrasında PCV'nin (Birincil Koruma Kazanı) dibine doğru ilerlemiştir. Kızgın yakıt PCV'ye de zarar vermiştir.

Yakıt kuruma süreci başladığında hidrojen patlaması kaçınılmaz hâle gelmiştir. Reaktör binasında hidrojen patlaması olma riski, Fukushima kazası öncesinde nükleer santrallerde ciddi olarak hesaba katılmış bir konu değildir. Patlama görüntüleri kamuoyunda önemli etkiler bırakmıştır. PCV havalandırması, çoğunlukla buhar ve bir miktar da hidrojen salınımı sağlamıştır; ancak bu durum hidrojen patlamalarının önüne geçmek için yeterli olmamıştır. Bu nedenle, hidrojen patlamalarına engel olunamamıştır.

Şu ana kadar ölçülen radyoaktif izotoplar İyot, Sezyum, Tellür ve Stronsiyumdur. Bunların tümü suda çözülebilirdir ve hidrojen patlamasıyla birlikte reaktörün dışındaki çevreye yayılmışlardır. Fukushima nükleer santrali çevresindeki toprakta geniş bir kirlilik alanı oluşturmuşlardır. Kazayı izleyen birkaç ayda en baskın izotopun Sezyum olduğu görülmüştür. Sezyum-137'nin yarı ömrü 30 yıl olduğundan, çevre kirliliğinin makul ölçülere gerilemesi çok uzun zaman alacaktır.

Japonya'da medyanın nerdeyse tümü hidrojen patlamasını engelleyebilecek ya da kazanın etkisini hafifletebilecek havalandırma uygulamasının geç başlatıldığını öne sürmüştür. Ancak, daha önce F2 ve F3 kaza süreçlerinde açıkladığımız gibi, havalandırmada gecikme olmamıştır. F1'de bir miktar gecikme olmuş olabilir; ancak bu gecikmenin kazaların sonucuna etkisi olmamıştır. Bu anlamda tesislerin hiçbirinde havalandırma gecikmeli olarak temin edilmemiştir.

Çalışmamızda yangın söndürme ekipleri tarafından enjekte edilen suyla ilgili araştırmaya yer verilmemiştir. Yakıt kuruma süreci bir kez başladığında, bunu durdurmak artık mümkün olamamaktadır ve birkaç saat içerisinde süreç tamamlanmaktadır. Ancak bu ekiplerin çabalarının da ciddi farklar yarattığı inancındayız. Aslında, ilk üç hafta içerisinde bu dört tesisten herhangi birine su enjekte etmekte başarısız olsalardı (tatlı su veya deniz suyu), çok daha ciddi boyutlarda bir felaketle karşı karşıya kalabilirdik.

12 Nisan günü Japon hükümeti Fukushima'daki kazanın Çernobil kazasının 1/10'u kadar radyoaktivite yaydığını açıklamış ve kaza seviyesini Seviye 7 olarak belirtilmiştir. Bu seviye INES (Uluslararası Nükleer Olaylar Ölçeği) derecelendirmesine göre en ciddi seviyedir ve Çernobil'le aynı seviyededir. Fukushima'daki üç reaktörde ciddi kor hasarı oluşmuş olsa da, Çernobil'e göre farklılıklar göze çarpmaktadır. Bu farklılıkları şöyle özetleyebiliriz:

(1) Nükleer patlama meydana gelmemiştir ve Çernobil'deki kadar büyük bir yangın ortaya çıkmamıştır. F1/2/3/4'te ciddi görünen hidrojen patlamaları olsa da bunlar nükleer patlama değildi. Aynı zamanda, bazı yerlerde yangın çıkmış olsa da bu yangınlar Çernobil'de olduğu gibi nükleer maddeleri gökyüzüne yaymamıştır.

(2) Fukushima kazasında çevreye yayılan radyoaktivitenin çoğu İyot ve Sezyumdu. Bu elementlerin büyük bölümü reaktör/türbin binasının zemin katındaki suya transfer edilmiştir ve hâlâ burada bulunmaktadır.

(3) Semptomlar değerlendirilip gözlemlendiğinde herhangi bir tesis için yeniden kritik bir durumun ortaya çıkmayacağı belirlenmiştir,

çünkü RPV'nin dibindeki yakıt ya yakıt tableti yığını ya da erimiş yakıt yığını halindedir. Bu şekliyle yeniden kritik hâle gelmesi olanaklı değildir.

(4) Fukushima'da buhar patlaması olmamıştır. Bunun nedenlerinden biri RPV'nin altında su havuzu bulunmamasıdır. Tahminlerimize göre, diğer bir neden ise yakıtın büyük bir metal uranyum veya uranyum oksit yığını oluşturmamış olmasıdır. Aksi durumda buhar patlaması için zemin oluşmaktadır.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, kazanın daha iyi anlaşılması adına sunmuş oldukları geniş endüstriyel bilgi için Arıza İnceleme Kurumu'nun üyelerine ve şekillerin bazılarında sunmuş olduğu yardımlar için Sn. Yoshie Fukumoto'ya teşekkür etmektedirler.

{SON}

NOT: Dizi yazı editörlüğü Mahir Ulaş Akcan tarafından yapılmıştır.

KAYNAKÇA (Tamamı)

1. "In Europe and China, Japan's Crisis Renews Fears About Nuclear Power"[Japonya Krizi Avrupa ve Çin'de Nükleer Güçle ilgili 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)
12. "Current Status of Nuclear Power Generations"[Nükleer Santrallerin Bugünkü Durumu], Japonca, TEPCO, 2009.
13. "Fukushima-dai-ichi Nuclear Power Stations, Outline of Facilities" [Fukushima-dai-ichi Nükleer Santralleri, Ana Hatlarıyla Tesisler], Japonca, Alındığı yer: (http://www.tepco.co.jp/nu/f1-np/intro/outline/ outline-j.html)
14. "Radiation level in Chiba-city on March 15th to 31st" [15-31 Mart arasında Chiba City'deki Radyasyon Seviyesi], Japonca, Japan Chemical Analysis Center [Japonya Kimyasal Analiz Merkezi], Nisan 2011, Alındığı yer: (http://www.jcac.or.jp/lib/senryo_lib/nodo.pdf)
15. "Advanced Boiling Water Reactor" [Gelişmiş Kaynar Su Reaktörü], TEPCO broşürü.
16. "Introduction of Nuclear Engineering"[Nükleer Mühendisliğin Doğuşu], J.R. Lamarsh, 1975.
17. "Detection of radio-active materials from soil at the Fukushima site"[Fukushima çevresindeki toprakta radyoaktif maddelerin tespiti], Japonca, 28 Mart 2011, METI, Alındığı yer: (http://www.meti.go.jp /press/20110328011/20110328011-2.pdf)
18. "Decay Energy Release Rates Following Shutdown of Uranium-Fueled Thermal Reactors" [Uranyum Yakıtlı Termik Reaktörlerin Kapatılmasının Ardından Bozulma Enerjisi Salınım Oranları] ANS Standards Committee [ANS Standartlar Komitesi], 1971.
19. "Decay Heat and its Recommended Value" [Bozulma Isısı ve Önerilen Değeri], Japonca, Atomic Energy Society of Japan [Japonya Atom Enerjisi Kurumu], 1989.
20. "Fukushima Nuclear Power Station 1 Facility Data" [Fukushima Nükleer Santrali 1 Tesis Verileri], Japonca, Alındığı yer: (http://www.tepco.co.jp/nu/programs/viewf1-j.html)
21. TEPCO Basın Bildirisi, 29 Kasım, 2010, "Periodic Maintenance of Nuclear Power Plant Fukushima Unit 4"[Fukushima Nükleer Santrali 4. Biriminin Periyodik Bakımı], Japonca, Alındığı yer: (http://www.tepco.co.jp/cc/press/10112901-j.html)
22. "NUREG-1738: Technical Study of Spent Fuel Pool Accident Risk at Decommissioning Nuclear Power Plants"[NUREG-1738: Nükleer Santrallerin Devreden Çıkarılmasında Kullanılmış Yakıt Havuzu Kaza Riskinin Teknik Analizi], USNRC, 2001.
23. Chubu Electric Power Co. Basın Bildirisi, 6 Nisan,2011, "Countermeasures at Hamaoka Nuclear Power Plants for Tohoku Earthquake" [Hamaoka Nükleer Santrallerinde Tohoku Depremine Karşı Önlemler], Japonca, Alındığı yer: (http://www.pref.shizuoka.jp/bousai/event/documents/siryou3-4.pdf)