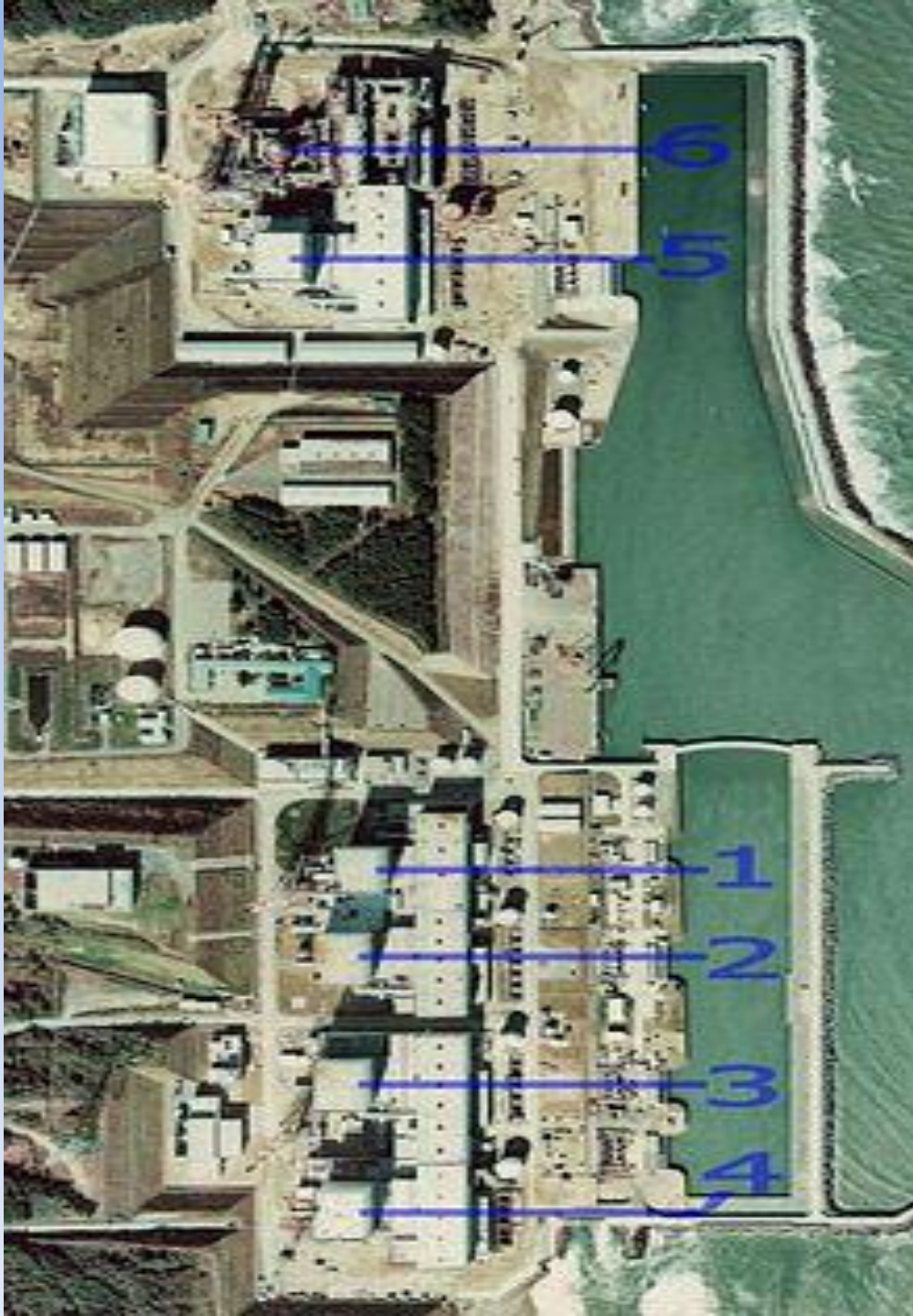


# Fukushima:

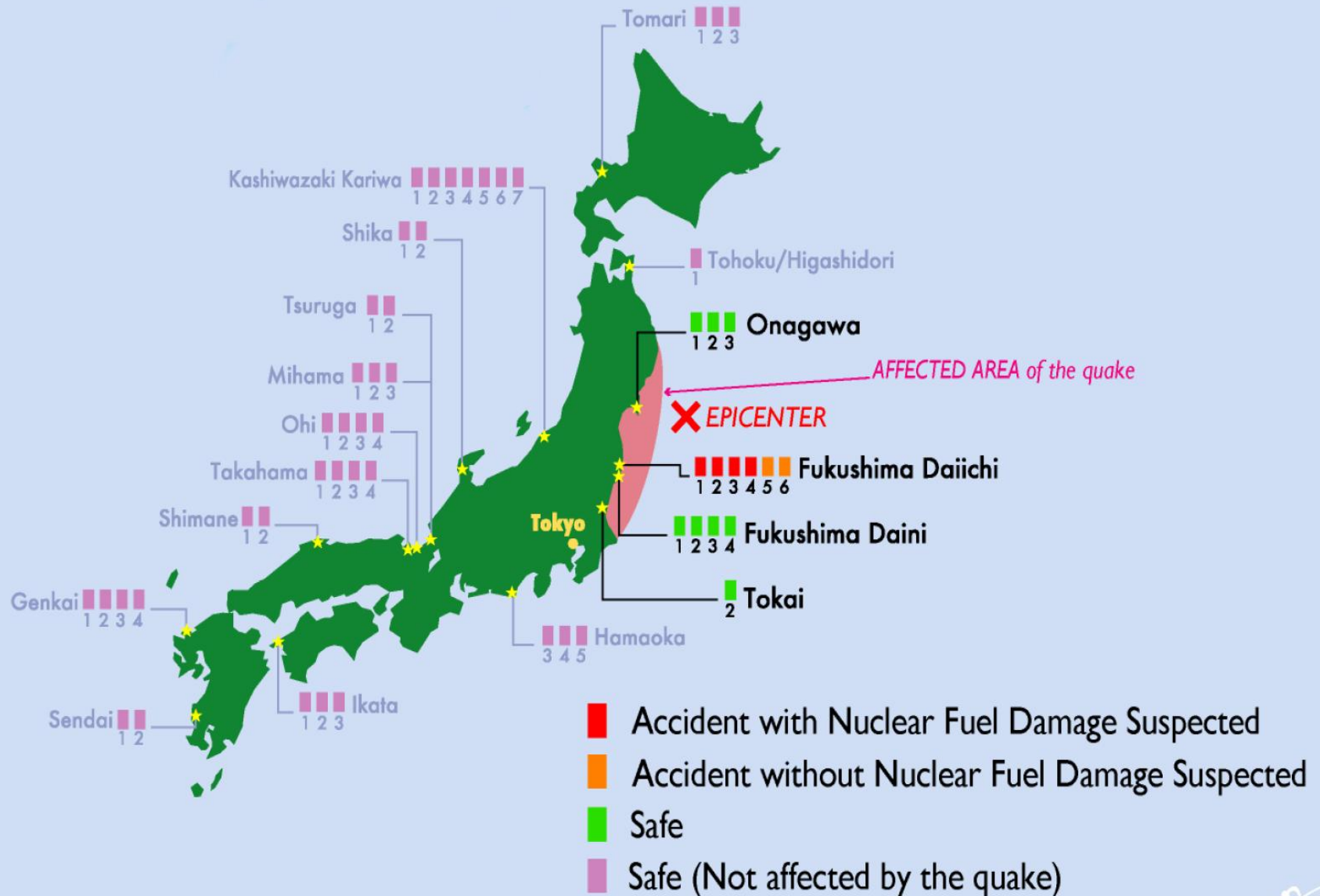
17 maart 2011

Gebeurtenissen  
en gevolgen

Frits de Mul



# Kernreactoren in Japan

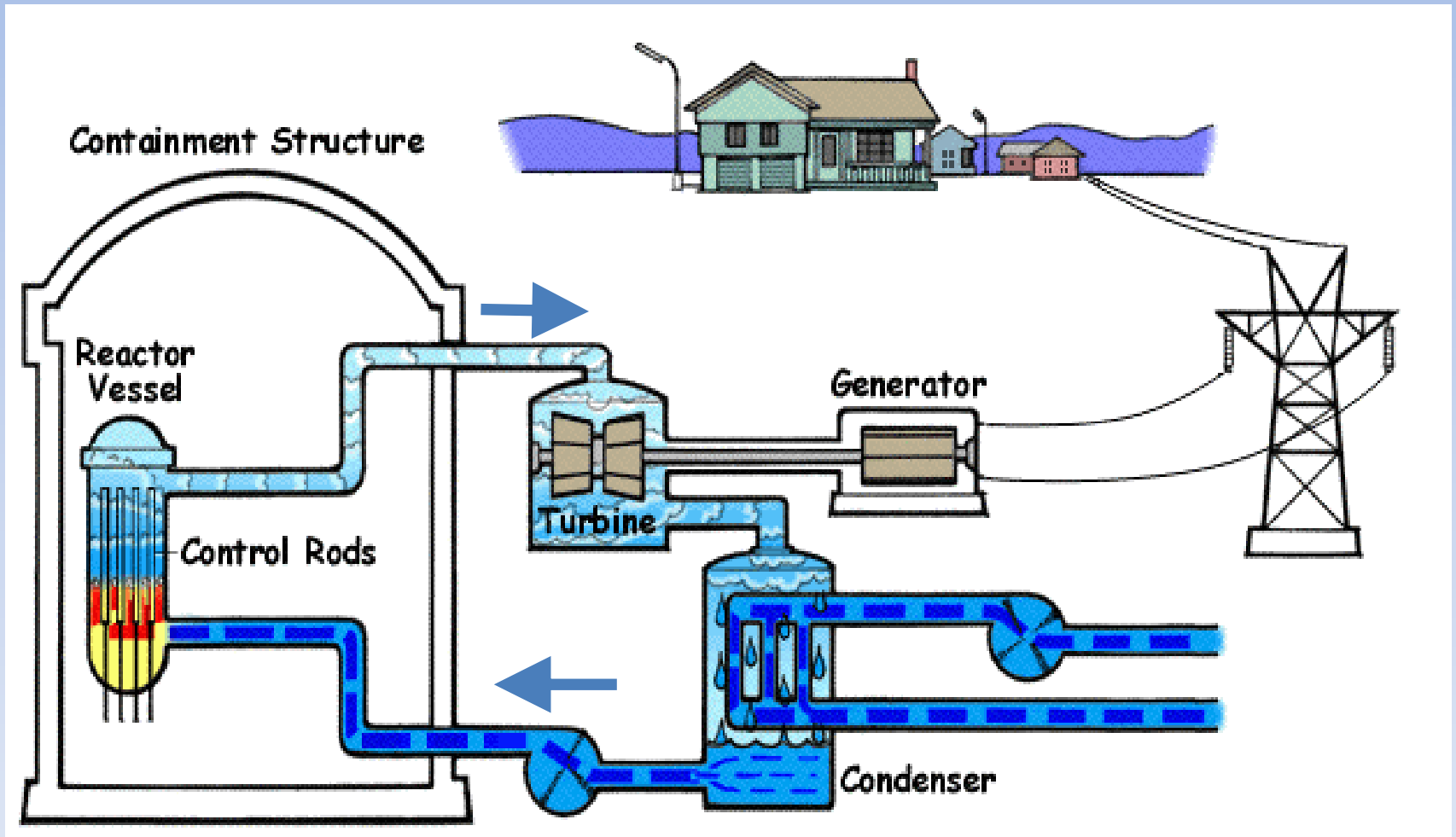


# Japan: nucleaire energievoorziening:

- 30% nucleair
- 40% doelstelling voor 2017
- 54 kernreactoren in bedrijf

# Kerncentrale: werkwijze

- “Directe” cyclus: stoomvorming binnen het reactorvat
- Druk ca. 75 bar, temperatuur ca. 285 °C



## Cerenkov-effect in kernreactor

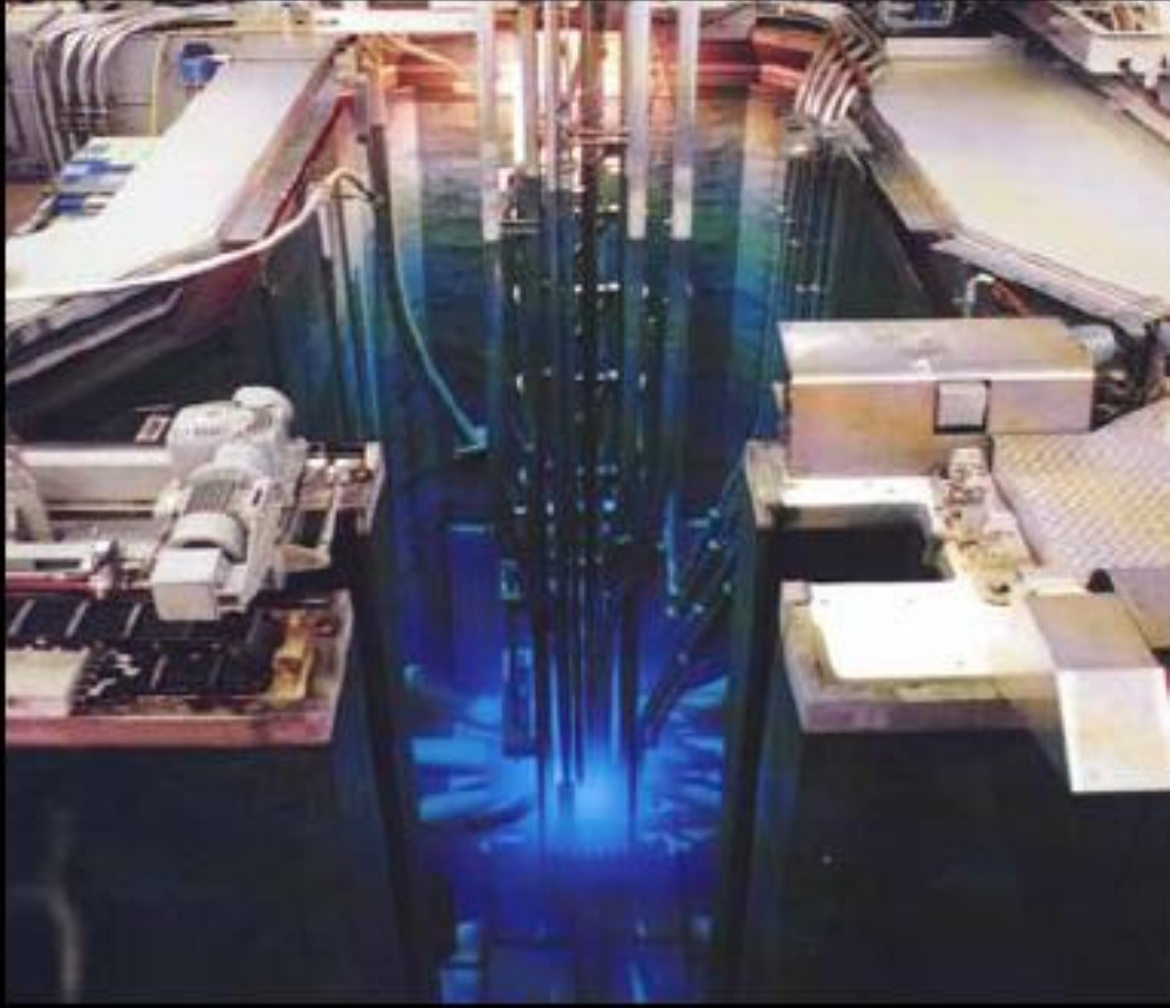


Foto: Onderzoeksreactor (3 MW), Techn. Univ. Delft.  
FdM

# Chronologisch overzicht

Datum	Tijdstip	Gebeurtenis
11-03-2011	14:46 uur	<b>Aardbeving</b> (kracht 9.0); verlies van externe netverbinding
	15:52 uur	<b>Tsunami</b> (14 meter hoge golven) Verlies van on-site power
		<b>Station blackout</b>
	~24.00 uur	Verlies van DC power (accu' s)

12-03-2011	15 uur	<b>Waterstofexplosie</b> in unit 1
14-03-2011	11 uur	<b>Waterstofexplosie</b> in unit 3
15-03-2011	06 uur 09 uur	<b>Waterstofexplosie</b> in unit 2 en 4 Brand in unit 4

# Satellietfoto 18 maart 2011



# De Gebeurtenissen – Oorzaak & Gevolg (1)

Oorzaak	Gevolg	Actie
Aardbeving	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Automatisch afschakelen reactoren</b></li> <li>• Uitval extern net</li> <li>• Opstarten dieselgeneratoren</li> <li>• Containment isolatie</li> <li>• Activeren reactor isolatie koelsysteem</li> <li>• Activeren afvoer van vervalwarmte naar zee</li> </ul>	
Tsunami	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uitvallen dieselgeneratoren</li> <li>• Verlies afvoer van vervalwarmte naar zee</li> </ul>	Inzet mobiele dieselgeneratoren, pompen en brandslangen
Totaal verlies van AC power (Station Blackout)	<p><i>Geen afvoer vervalwarmte naar zee</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Openen drukaflaatkleppen</li> <li>➤ Toename druk en temperatuur in containment</li> <li>➤ Daling waterniveau reactorvat</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Afblazen naar containment</li> <li>➤ Drukontlasten containment</li> <li>➤ Zeewaterinjectie in reactorvat</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Daling waternivo splijststofopslagbassin</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Zeewatersproei splijststofbassins</li> </ul>



## De gebeurtenissen – Oorzaak & Gevolg (2)

Oorzaak	Gevolg	Actie
<p>Drukонтlasten containment</p> <ul style="list-style-type: none"><li>➤ Naar reactorgebouw</li></ul> <ul style="list-style-type: none"><li>➤ Naar omgeving</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ <b>Waterstofexplosie</b><ul style="list-style-type: none"><li>➤ Falen integriteit containment (Unit 2)</li><li>➤ Falen reactorgebouw (Units 1 en 3)</li></ul></li><li>➤ Vrijkomen radioactiviteit naar omgeving</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Preventieve en mitigerende maatregelen</li></ul>

# Status op 7 april 2011

Units 1, 2, 3	<ul style="list-style-type: none"><li>- reactorvat op lage druk</li><li>- koelen van kern met zoet water</li><li>- deel van de kern beschadigd / gesmolten</li><li>- lekkage besmet water naar turbinegebouw</li></ul>
Units 3 en 4	waterverlies splijststofopslagbassins → verdampen + lekkage koeling met zoet water
Units 5 en 6	cold shutdown

## NB:

- Externe netspanning hersteld
- Injectie zoet water in reactorvat door vaste pompen
- Injectie zoet water in splijststofopslagbassins door mobiele pompen
- Midden april: lekkages gedicht

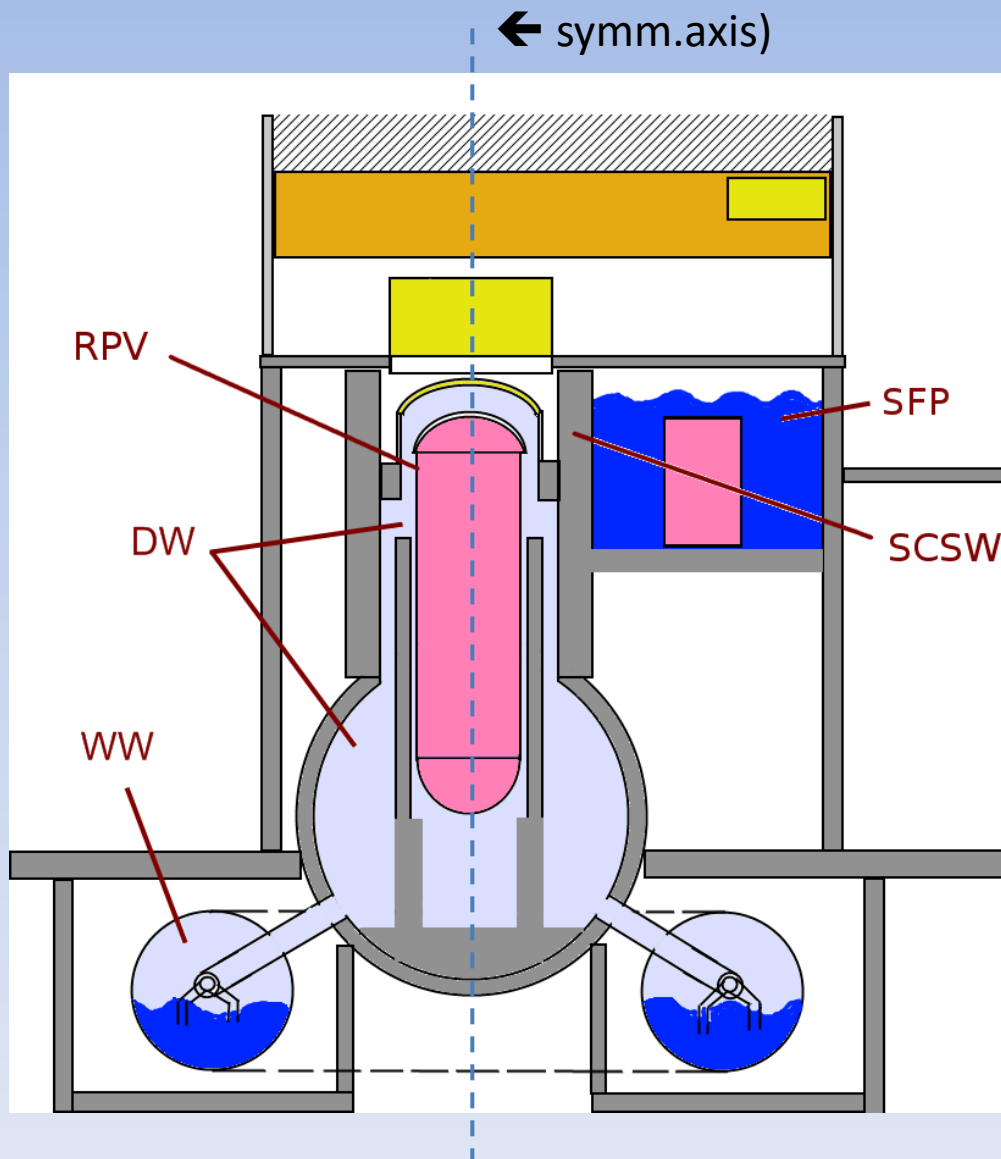
# “Confinement” van radioactieve stoffen

Vijf verschillende barrières:

- Splijtstofmatrix
- Splijtstofpen
- Reactorvat en koelcircuit
- Primair containment
  - Drywell en
  - suppression pool (= “zwembad”)
- Secundair containment
  - Reactorgebouw

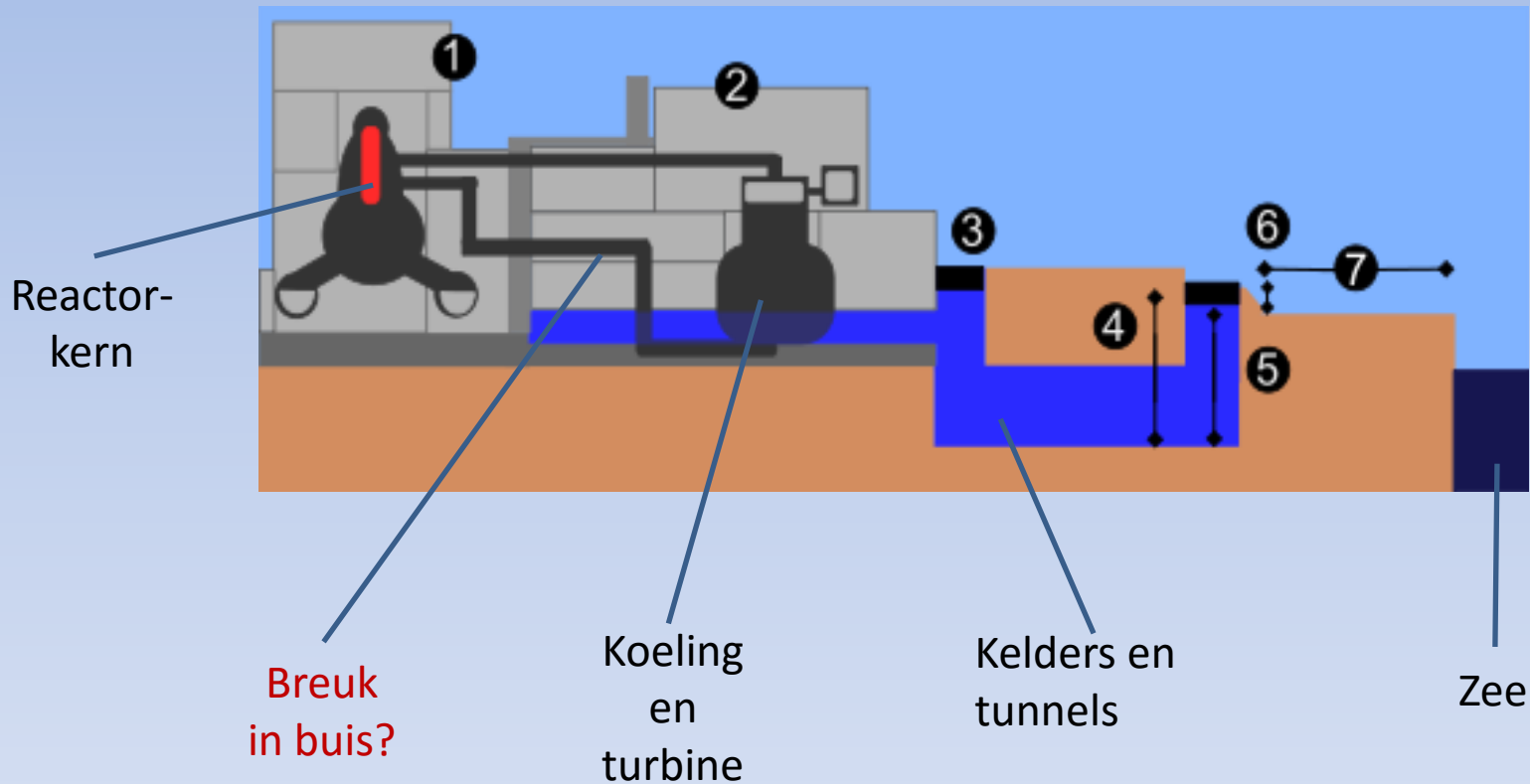


# Fukushima: containment



RPV: reactor power vessel  
DW: dry well  
WW: wet well (torus-shaped)  
SCSW: concrete shielding  
SFP: spent fuel pool

# Fukushima : tunnels



Probleem: door breuken in buizen etc. liep uiteindelijk radioactief water weg naar zee.  
Later is dit ook expres gedaan, toen er gekoeld moest worden met zeewater.

# Status 10 april 2011

	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5	Unit 6
Splijstofmatrix	X	X	X	-	√	√
Splijstofpen	X	X	X	-	√	√
Primair reactorsysteem						
- Reactorvat	√	√	√	√	√	√
- Koelcircuit	X	X	X	√	√	√
Primair containment						
- Drywell	√	√	√	√	√	√
- Suppression pool	√	X	√	√	√	√
Secundair containment	X	X	X	X	√	√

# Beëindiging van het Fukushima ongeval:

## Stappenplan 16 april 2011

Doel: Terugbrengen van de centrale in een stabiele, beheersbare toestand

stap	unit	actie	tijdsduur
1	1,3 2	Insluitsysteem vullen met water Afsluiten en vullen met water	3 mnd
2	4	Versterken bad met gebuikte splijtstofstaven	Id.
3	2,3	Stikstof in insluitsysteem (tegen explosies waterstof) (eerder al gedaan in unit1)	Eind april
4	1,2,3	“cold shutdown”	3-6 mnd
5	1,3,4	Stralings scherm	Id.

“cold shutdown”: temperatuur < 95°C en druk = 1 bar.

# Intermezzo: dosislimiteringen

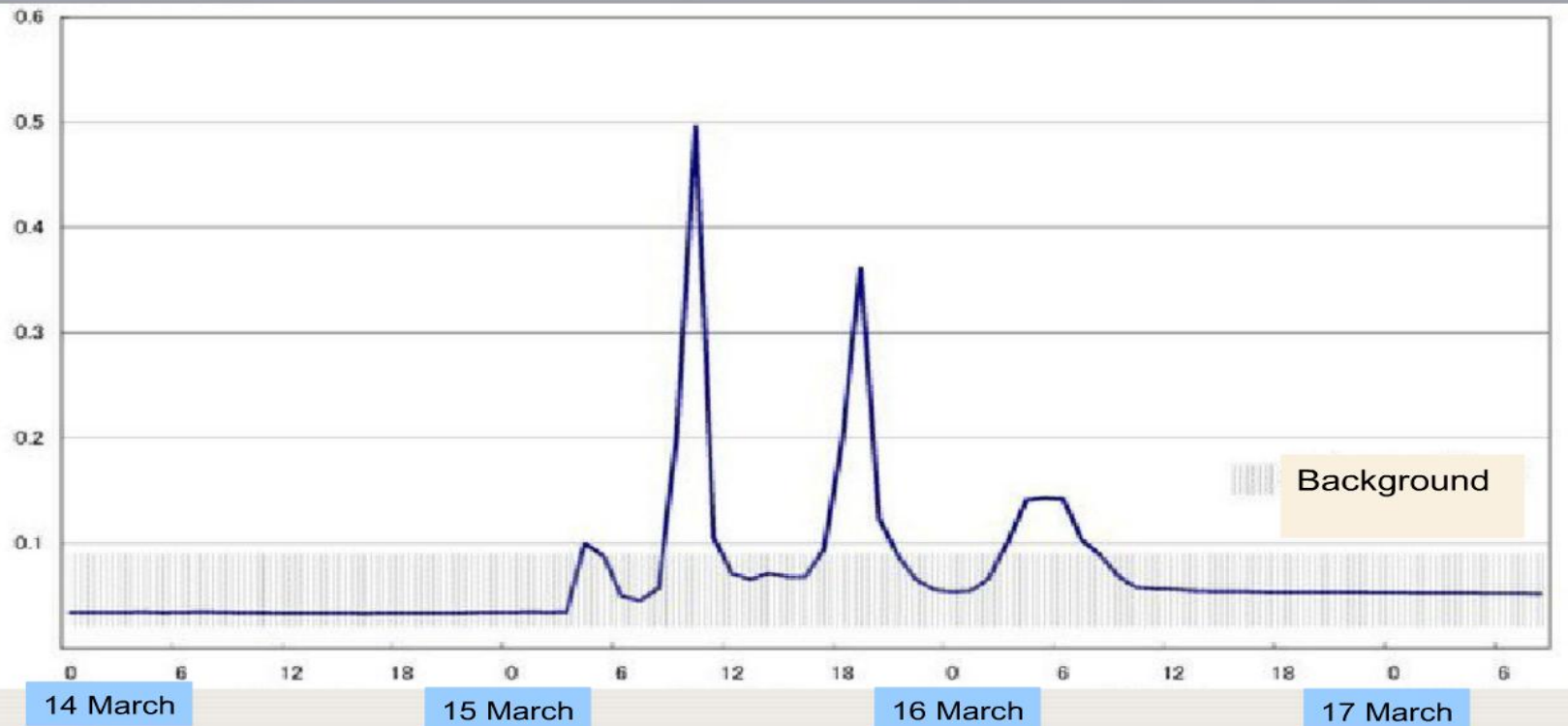
situaties	Max. dosis (mSv/j)	Extra kans op kanker (%)	Mogelijke aandoeningen
Regulier – kansgebonden - werkers (A-cat.) - anderen (bevolking)	20 1	0.1 0.005	Afhankelijk dosis (*): • Leukemie • Div. soorten tumoren
Regulier – deterministisch - extremiteiten - huid - ooglenzen	500 500 150	- - -	> 1 Sv: Cataract > 2 Sv: Stralingsziekten > 10 Sv: Darm- en bloedsyndromen (dodelijk)
Interventies (kritieke situaties) - levensreddend handelen - veiligstellen materiële belangen - hulpverlening	750 250 100	3.75 1.25 0.5	

(\*) Extra kans op kanker (voor kansgebonden effecten): **5 % per Sv.**



# Dosistempi en gebeurtenissen

## Gamma-dose rate at Tokyo, 230 km South West (microSv/h)



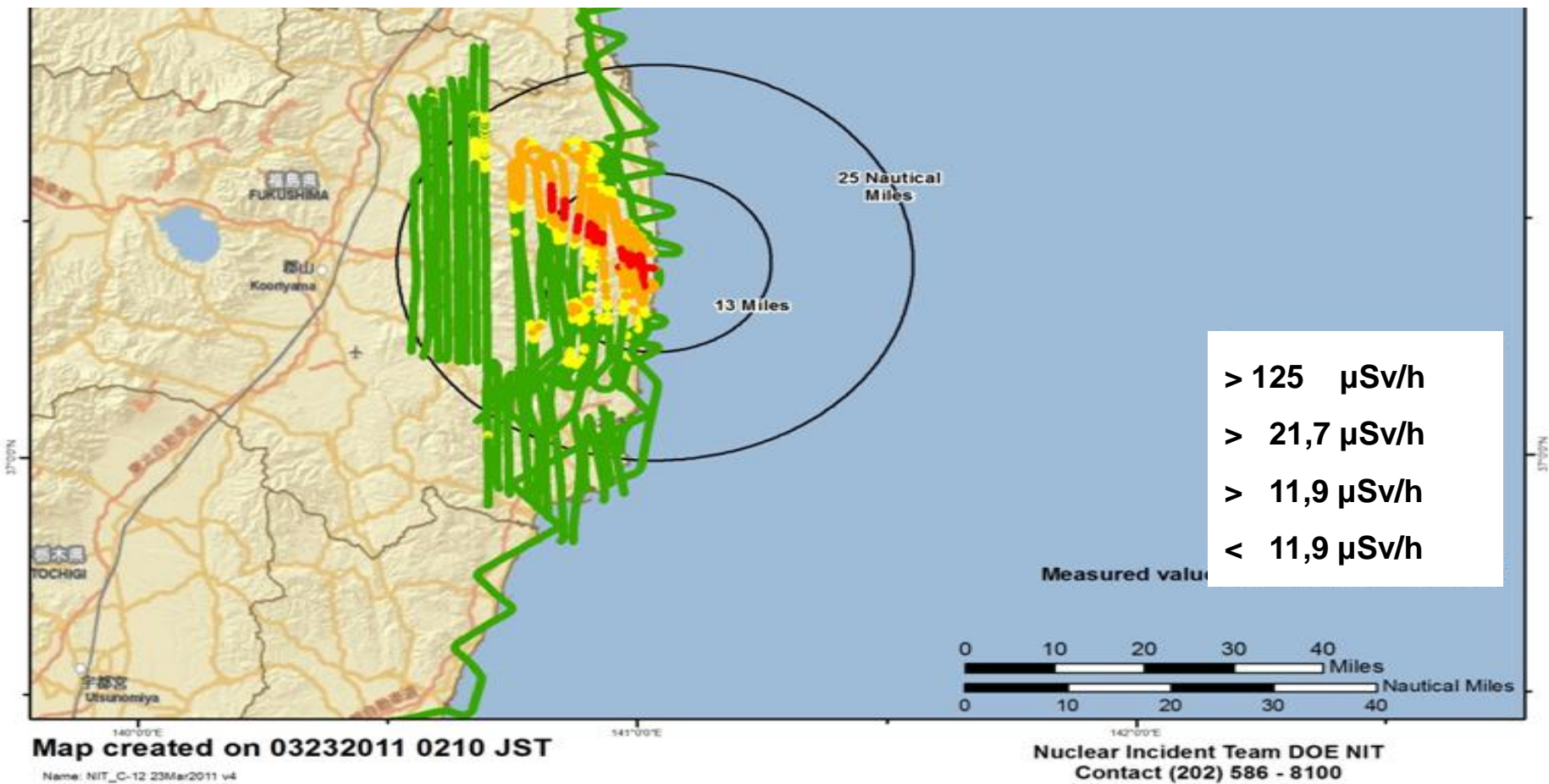
2 keer 0.4  $\mu\text{Sv/h}$  voor 3 h  $\Rightarrow$  2.4  $\mu\text{Sv}$ ;

Vgl. jaardosis NL: 2.5 mSv

# Emissieschattingen

- **Periode 12-15 maart:**
- **I-131: 400.000 TBq = 400 000 000 000 000 000 Bq**
  - 20% van Tsjernobyl emissie
  - 2% lozing van de activiteitsinventaris in units #1, 2 en 3
- **Cs-137: 30.000 TBq = 30 000 000 000 000 000 Bq**
  - 35% van Tsjernobyl emissie
  - uit reactoren units #1, 2 en 3 + SF pools units #3 en 4:  
1% lozing van totale activiteitsinventaris

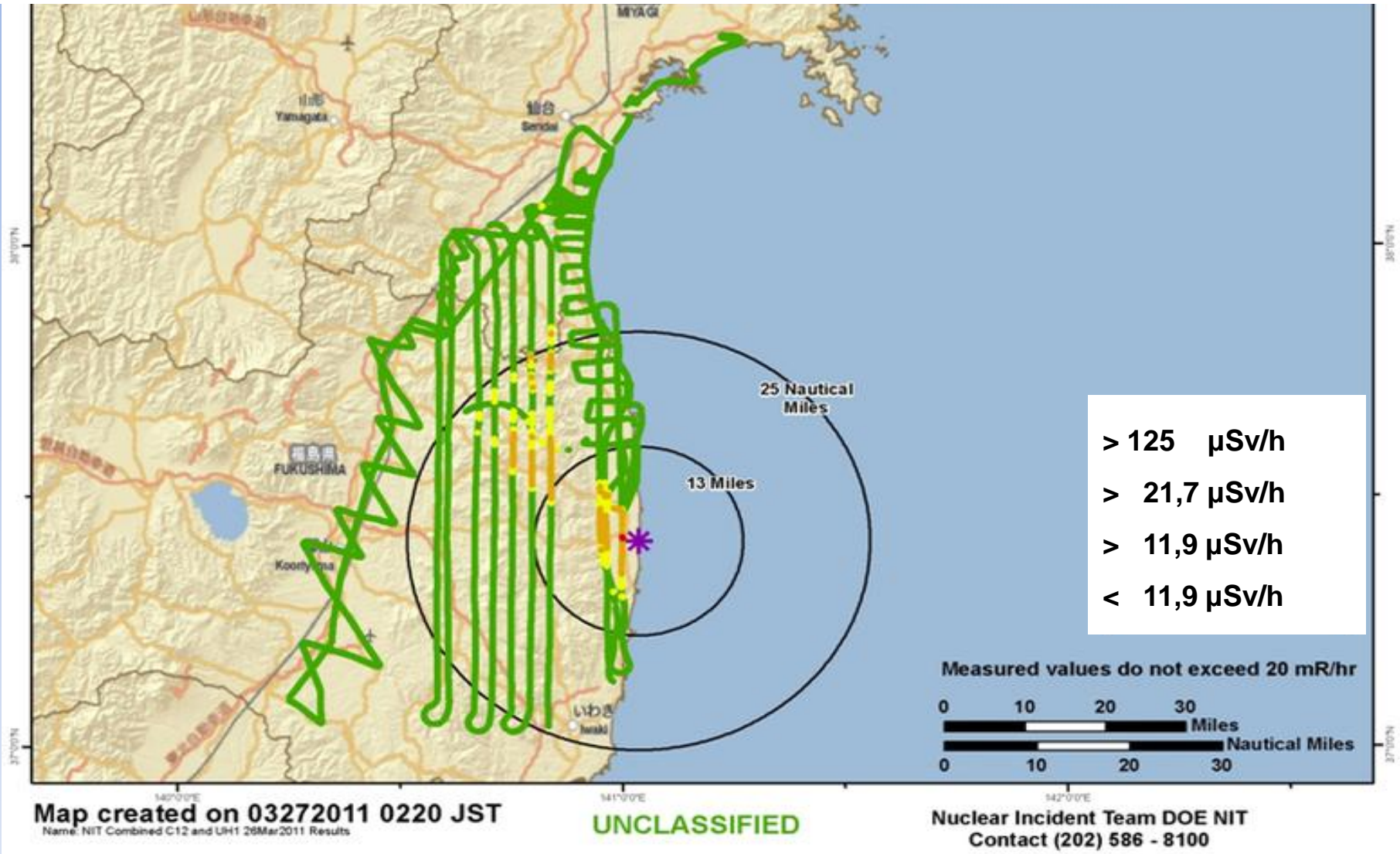
# Aerial survey 17-19 Maart 2011



Indien 24 h in 125  $\mu\text{Sv/h}$  => 3000  $\mu\text{Sv}$  = 3 mSv  
Indien 1 vol jaar in 125  $\mu\text{Sv/h}$  => 1100 mSv

(vgl. achtergrond in Ned.: 2 mSv/j; in Frankrijk: 6 mSv/j; in Finland: 8 mSv/j)

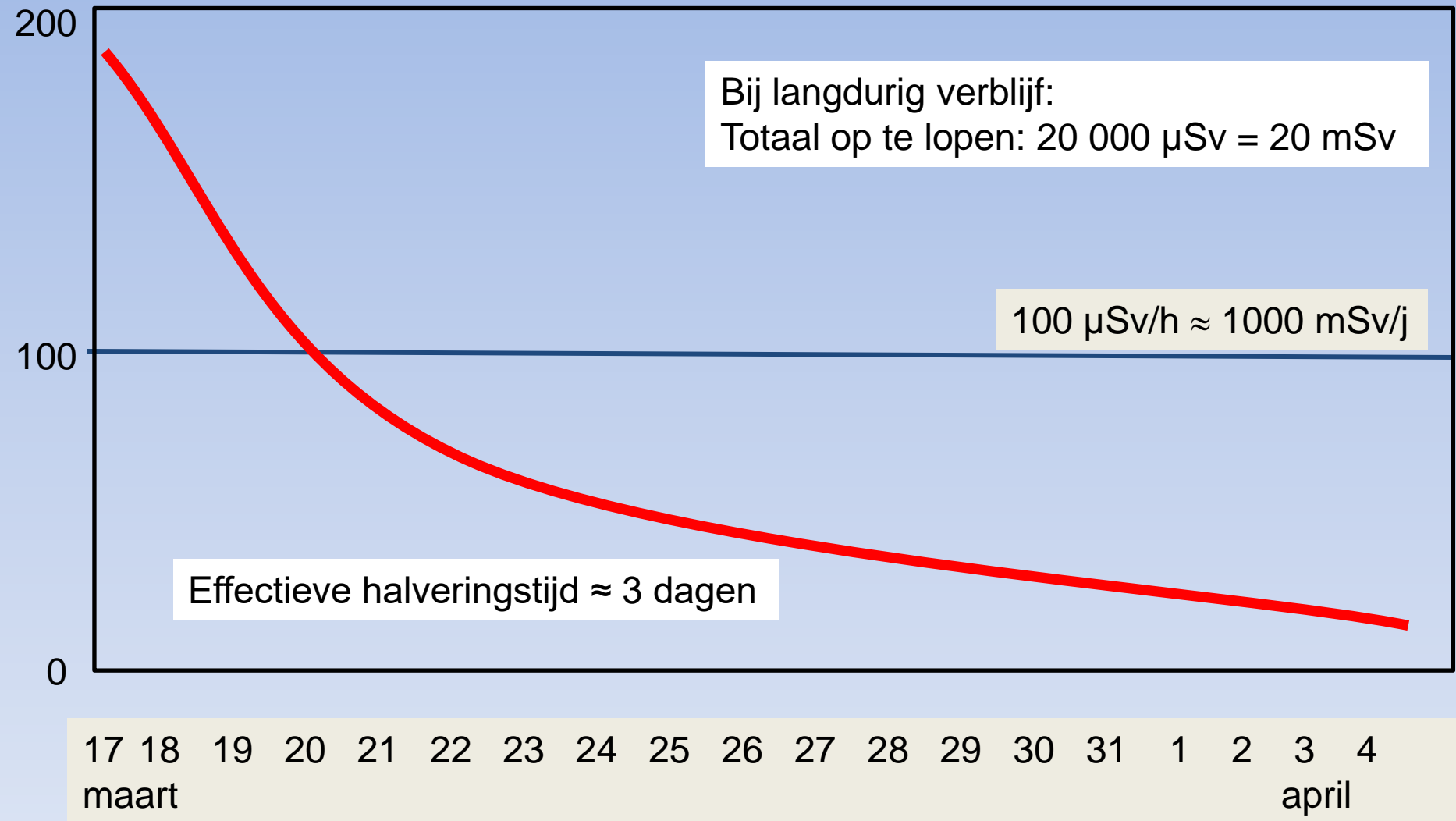
# Aerial surveys 24-26 Maart 2011



NB. Indien 1 vol jaar in  $125 \mu\text{Sv/h}$ : 1100 mSv (vgl. NL: achtergrond  $2 \text{ mSv/j}$ )

# Dosistempometingen in lucht

op  $\approx 30$  km NW van Fukushima (in  $\mu\text{Sv/h}$ )



Achtergrond NL: 2 mSv/j  $\approx$  0.2  $\mu\text{Sv/h}$

# Activiteitsmetingen op land (in Bq/m<sup>2</sup>)

datum	plaats	Activiteit I-131	Activiteit Cs-137	Jaardosis ( μSv/j ) indien vol jaar
23/3	Tokyo (230 km ZZW)	150	--	≈ 0.1
25/3	Ibakari (65 km ZZW)	480	150	≈ 0.7
28/3	Yamagata (110 km NNW)	750	1200	≈ 2.0
30/3	Iitate (40 km NW)	Piek 2 000 000	--	≈ 20 000 : Boven interventieniveau
2/5	Fukushima	20	19	≈ 0.04
2/5	Ibakari en alle andere prefectures < 80 km	1.7	2.6-19	≈ 0.003-0.02

vgl. NL: achtergrond ≈ 2 mSv/j

Bodem: 1000 Bq/m<sup>2</sup> = 1kBq/m<sup>2</sup> ≈ 1 μSv/j

1 MBq/m<sup>2</sup> ≈ 1 mSv/j (= max. voor bevolking) (vgl. NL: ≈ 50 Bq/m<sup>2</sup>)

# Activiteitsmetingen in voedingsmiddelen eind maart

- **Kitaibaraki** (75 km Z van Fukushima)
  - I-131: 24.000 Bq/kg in spinazie, uit handel
  - Cs-137: 670 Bq/kg
- **Ibaraki, Totigi, Gunma, Fukushima** (prefecturen):
  - Spinazie, (bloem)kool en melk uit de handel
- **Chiba, Ibaraki, Tochigi** (prefecturen):
  - Selderij, kool, spinazie uit de handel

Vgl.: NL: in 1986: gemeten max.: melk: 50 Bq/l; spinazie: 150 Bq/kg  
veilige limieten: melk: 2300 Bq/l ; spinazie: 6100 Bq/kg

rondom Chernobyl:

max. 1.5 MBq/m<sup>2</sup> → extra ≈ 1.5 mSv/j over 50 j

# Activiteitsmetingen in voedingsmiddelen

## 2 mei

- **I-131:** limiet = 100 Bq/l in drinkwater,  
in april relevant voor baby's voor één dorp,  
één prefectuur: gemeten 0.22 Bq/l  
3 andere prefecturen: 0.04, 0.10, 0.38 Bq/l
- **Cs-137:** 1 prefectuur: 0.05 Bq/l << limiet.
- 2 april: beperkingen in distributie van rauwe melk opgeheven, behalve Fukushima e.o.
- 1 mei: idem voor Fukushima e.o.

Vgl.: NL: in 1986: gemeten max.: melk: 50 Bq/l; spinazie: 150 Bq/kg  
veilige limieten: melk: 2300 Bq/l ; spinazie: 6100 Bq/kg

rondom Chernobyl:

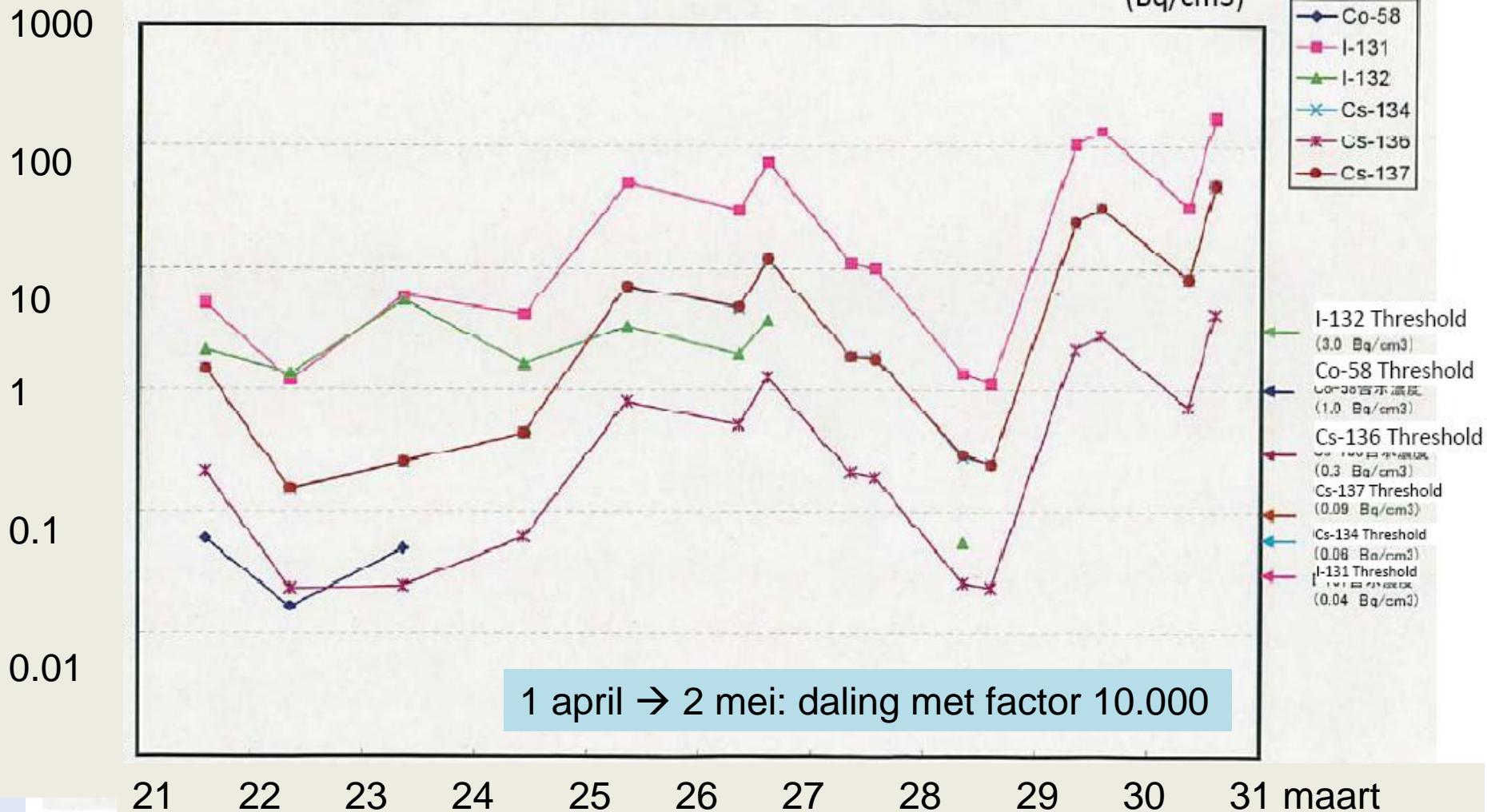
max. 1.5 MBq/m<sup>2</sup> → extra ≈ 1.5 mSv/j over 50 j



# Activiteitsmetingen in zee (in Bq/cm<sup>3</sup>)

1 Bq/cm<sup>3</sup> = 1 000 Bq/liter = 1 000 000 Bq/m<sup>3</sup>

Concentration in Seawater near (1F South Outlet)  
(Bq/cm<sup>3</sup>)



# Gammastraling (halvering elke 3-4 dagen)

datum	plaats	Dosis ( $\mu\text{Sv/h}$ )	Dosis (mSv/j) indien vol jaar
17 maart	div. prefecturen	3 - 170	30 - <b>1700</b>
	> 50 km afstand	< 5	< 50
22 maart	35-85 km	0.8 - 9	8 - 90
23 maart	30-32 km NW	16 - 59	160 - <b>590</b>
30 maart	idem	0.5 - 7	5 - 70
31 maart	Tokio	< 0.3	< 3
6 april	45 prefect. rond Fukushima	0.02 - 0.16	0.2 - 1.6
7 april	Fukushima	2.3	23
	Ibaraki	0.16	1.6
	Andere prefecturen	< 0.1	< 1
2 mei	Fukushima	1.7	17
	Ibaraki	0.11	1.1
	Andere prefecturen	< 0.1	< 1

Natuurlijke jaardosis in Japan: 1 – 3 mSv/j (afh. locatie)  
 Vgl. Nederland: 2 mSv/j

# Effecten op zeeleven

- **Verdunning** door zeestroming - Accumulatie in voedselketen
- **Effecten:** ziekte, sterfte, voortplanting (grootste gevoeligheid)
- **Zeewier**
  - Accumulatie I-131
  - Effecten op groei bij honderden mSv/dag – 1 Sv/dag (2 – 5 mSv/h)
- **Schaaldieren**
  - Geen effect op groei bij 1 Sv/dag
- **Vissen:**
  - LD<sub>50</sub> kan oplopen tot tientallen Sv
  - geen effect op voortplanting bij enkele – tientallen mSv/dag → bij tientallen – honderden MSv/kg vis

# Voorlopige conclusies

- **Stralingsziekte** bij werkers? Niet geconstateerd.
- **Persoonsdoses** werkers < 250 mSv
- **Schildklierdoses** bij kinderen waarschijnlijk beperkt door evacuatie en andere maatregelen
- **Maatschappelijke en sociale ontwrichting** door aardbeving, tsunami en evacuatie en onzekerheid en angst over de gevolgen van bestraling en 'besmetting' → grote kans op PT stress-syndroom
- **Volgende weken :**
  - meten '**besmettingsgraad**' op land en activiteitsconcentraties in zee
  - nagaan: mogelijk aantal **gebieden** voor langere tijd niet voor menselijke activiteiten geschikt?

# Fukushima: probleem: koeling

Tijd na uitschakelen	Percentage (%)
1 s	6
10 s	5
1 h	2
1 d	0.5
10 d	0.3
30 d = 1 mnd	0.2
100 d = 3 mnd	0.1
1000 d = 3 j	0.06
10.000 d = 30 j	0.02

Vervalwarmte na  
uitschakelen reactor

In % van normaal vermogen

(Fukushima: 1000 MW)

# Fukushima: probleem: koeling

Reactoren (elk  $\approx 1000$  MW thermisch) produceren, indien uitgeschakeld, na 1 dag nog ongeveer **0.5 %** (5 MW) van hun warmte.

Benodigd koelwater voor 5 MW = **5 MJ / s = 5 000 000 J / s:**

**Koelwater** : warmte voor opwarmen: 4,200 J / g. $^{\circ}$ C (“Binas”)

Stel temperatuur : 20  $\rightarrow$  60  $^{\circ}$ C : dus 40  $^{\circ}$ C opwarming

Nodig per kg: 4,2 x 40 = 168 J / g =

Dus benodigde hoeveelheid water:

$$\frac{5\,000\,000\text{ J/s}}{168\text{ J/g}} = \frac{5\,000\,000\text{ g}}{168\text{ s}} \approx \frac{5000\text{ kg}}{168\text{ s}} = 30\frac{\text{kg}}{\text{s}} = 30\frac{\text{liter}}{\text{s}} = 108\text{ ton/h}$$

Gebruikte pompen: 10-25 ton/h.