

Tracing the radionuclide:
What does atmospheric electric
field measurements tell us?

放射能の動きを追う:
大気電気で分かること、大気電気で
しか分からないこと

M. Yamauchi

上空の放射能の測定方法？

(1) Detecting γ -ray

- * dosimeter (e.g., Geiger)
- * γ -spectrometer

(2) Sampling

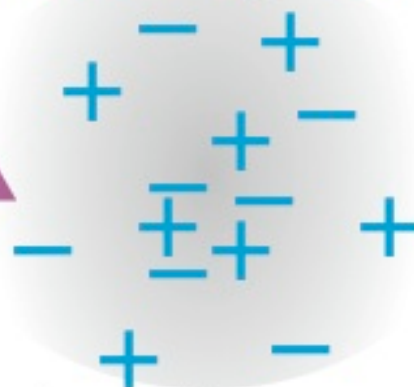
- * dust: given altitude
- * soil: cannot monitor

radioactive
material
 $^{134,137}\text{Cs}$
 $^{131,132}\text{I}$

γ -ray

γ -ray

ionized by γ -ray



(3) Detecting ions or electric conductivity

- * direct sampling
- * electric field (called PG)

生成物のイオンを調べる
⇒ 電場からイオンを調べる

表向きの動機

対象が何であれ、“Spread”と“dynamics”は地球科学の分野である。

我々(地磁気関係者)はリモート観測のプロであり、それを他の緊急データに応用できないようではプロを名乗る資格が無い

新分野(これほど密度の高い放射能データは過去に無い)であって、誰でも参入できる

「参入できる」だけでなく、参入を期待されてる

⇒ 4月3日付け日経のコラム『**科学者からの発信が少なすぎ**』、
『**こんな時に動けないで、何がパブリック・アウトリーチだ**』

本当の動機

竹田さんが既にチェックしていた！

そして、柿岡が放射能飛来前にギリギリ停電から復旧して、見事なデータを取っていた。

4月3日のメール

>あと、最近問題になっている海洋放射能汚染ですが、放射性物質が、その回りの物質を
>イオン化して電気伝導度を高める性質(空気中は効果は大きいですが、水中での効果は
>知りません)を利用して、汚染海域をリモートセンシング(飛行機や船)で大雑把に見積も
>る方法を模索中です。アイデアのある方はお知らせ下さい。

⇒ 竹田さんから即座に返事が返ってきて、そのまま4月15日には投稿(natureは編集者予備審査を通らなかったけど、3ヶ月後にGRLに載った)。

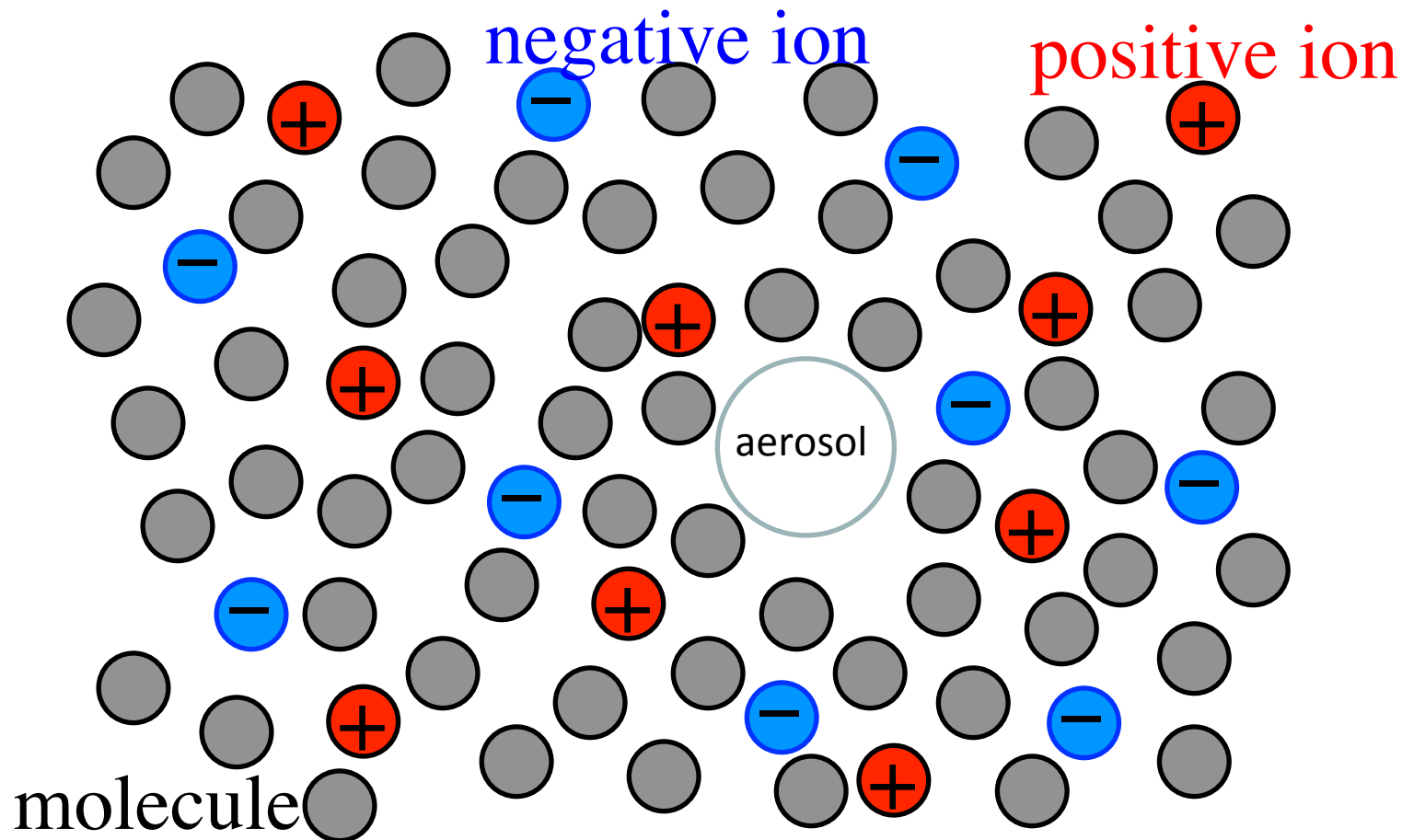
しかも、過去に無い「電場の揺り戻し」という新現象が見られた。⇒ 「謎の解釈」はいつも楽しい。

イオン密度 n : $dn/dt = q - \alpha n^2 - \beta nN$

q : 生成率(by cosmic ray, radon, and γ -ray): $\Rightarrow$ ここで放射能が効く

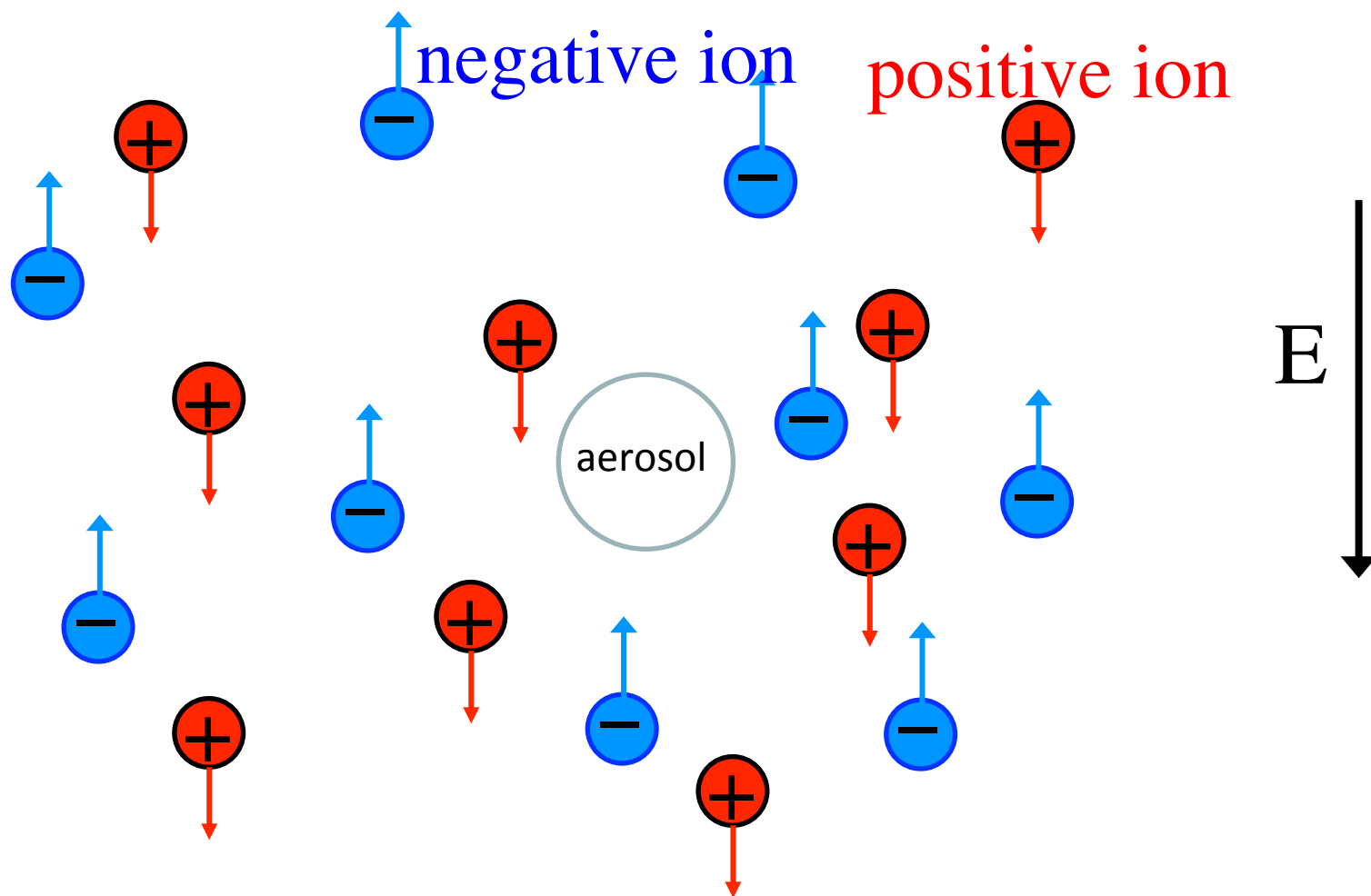
α : 再結合(中性化)率

β : 重い粒子(密度 N)への付着による実質電導度低下



$\Rightarrow$ イオンは大気電場に反応する

イオンは**大気電場**に反応する $\Rightarrow$ 測定可能！



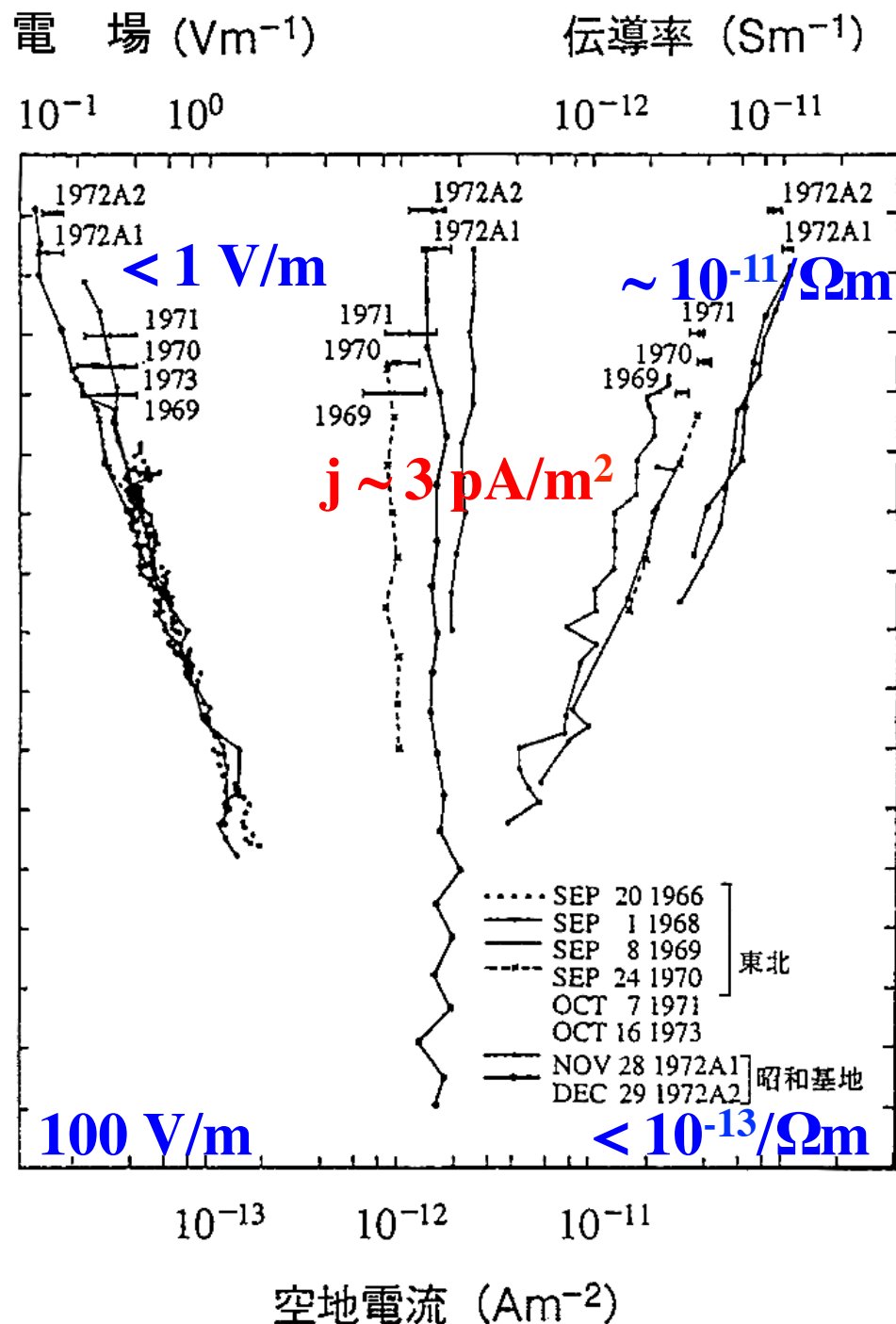
電場等の高度分布 (気球測定)

Ogawa et al. (1977)

確かに電流が流れてる

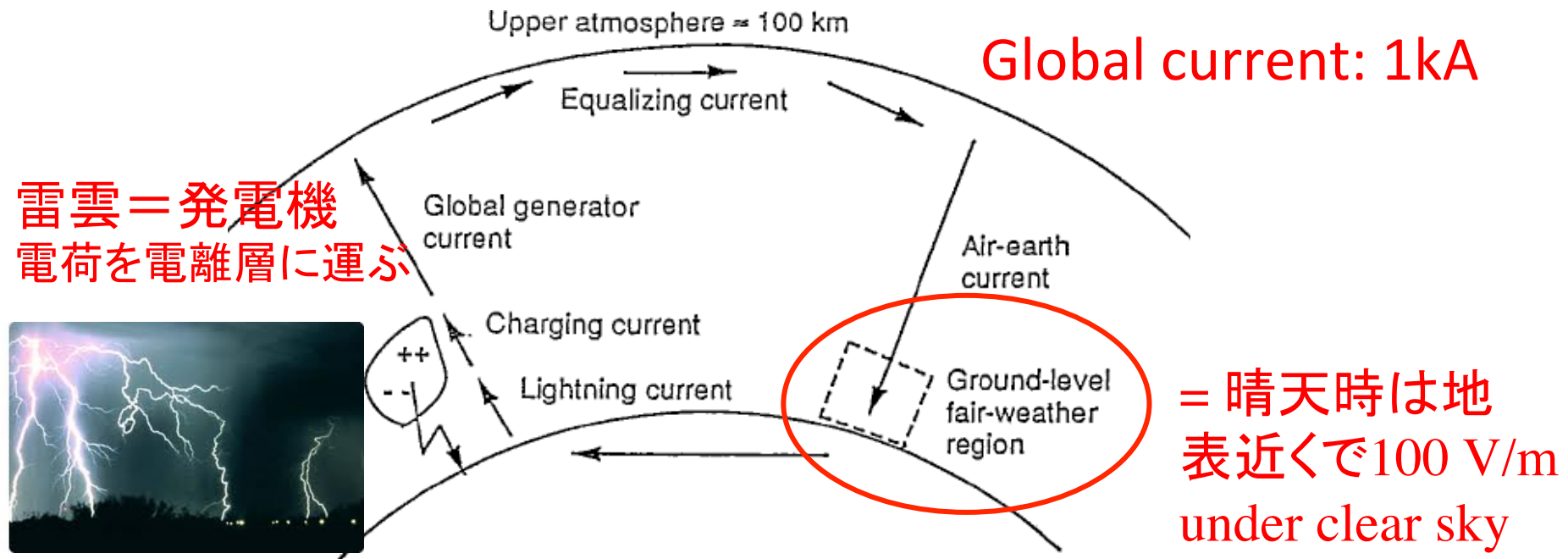
- (1) 電気伝導度 σ は
地表と上空で2桁
以上異なる。
- (2) みかけ上は定電流
⇒ 電気伝導度が電
場 (PG) を決める。

ground



晴天時が(みかけ上では)定電流の理由

電離層の電圧が世界規模で維持されている(200-300kV)から
= Global Circuit



雷雲(しぐれ雲を含む)の元での電場:

普通の雲 = dipole electric field (局所的なレベルの発電)

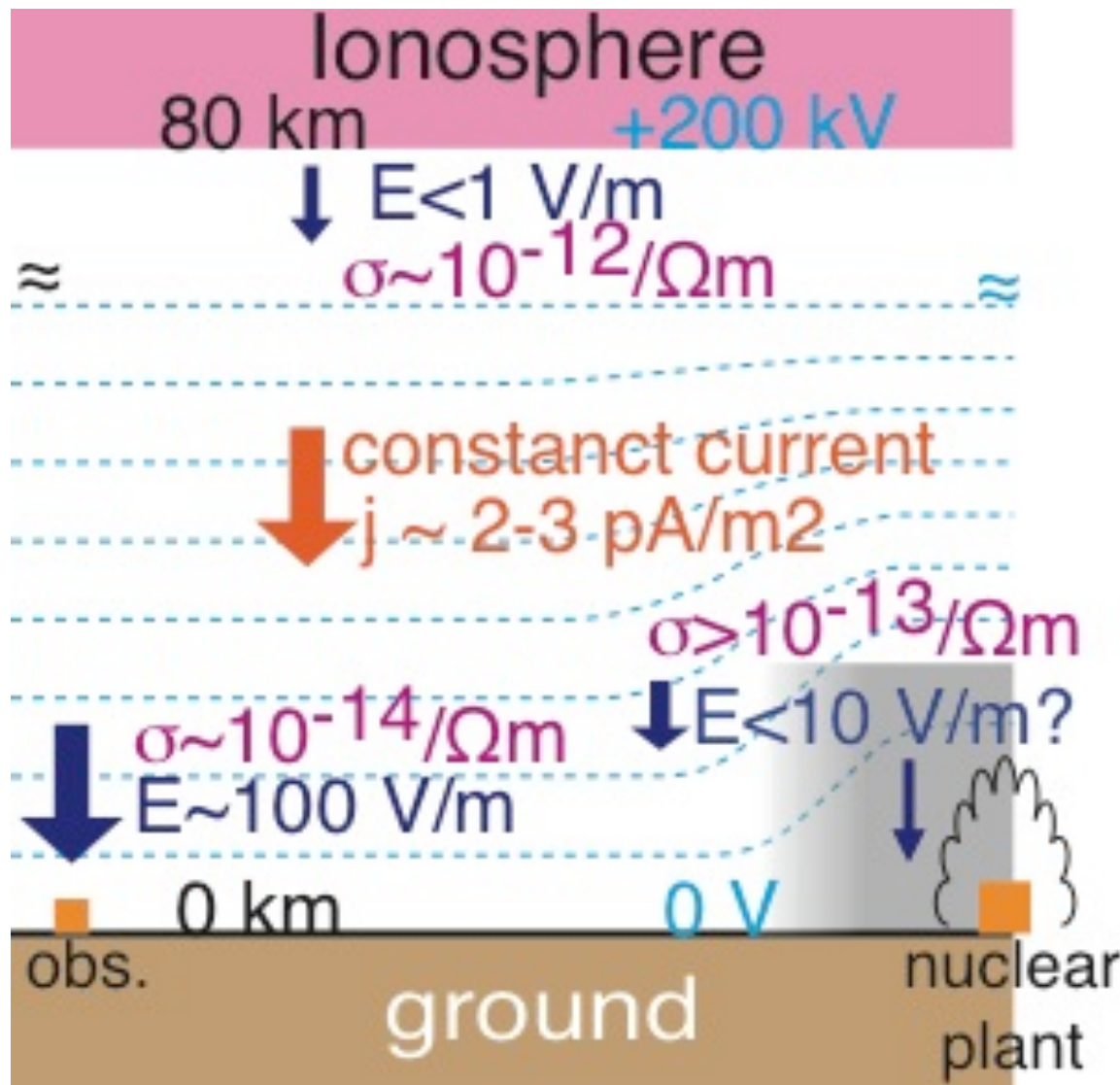
雷 = strong dipole electric field (世界規模の発電)

晴天下の電場:

= simple electrostatic field

「電離」放射能が地表付近にあったなら？

⇒ 浮遊にせよ地表沈着にせよ、**地表付近の σ が上がる**



⇒ **電場(PG)が弱くなる**

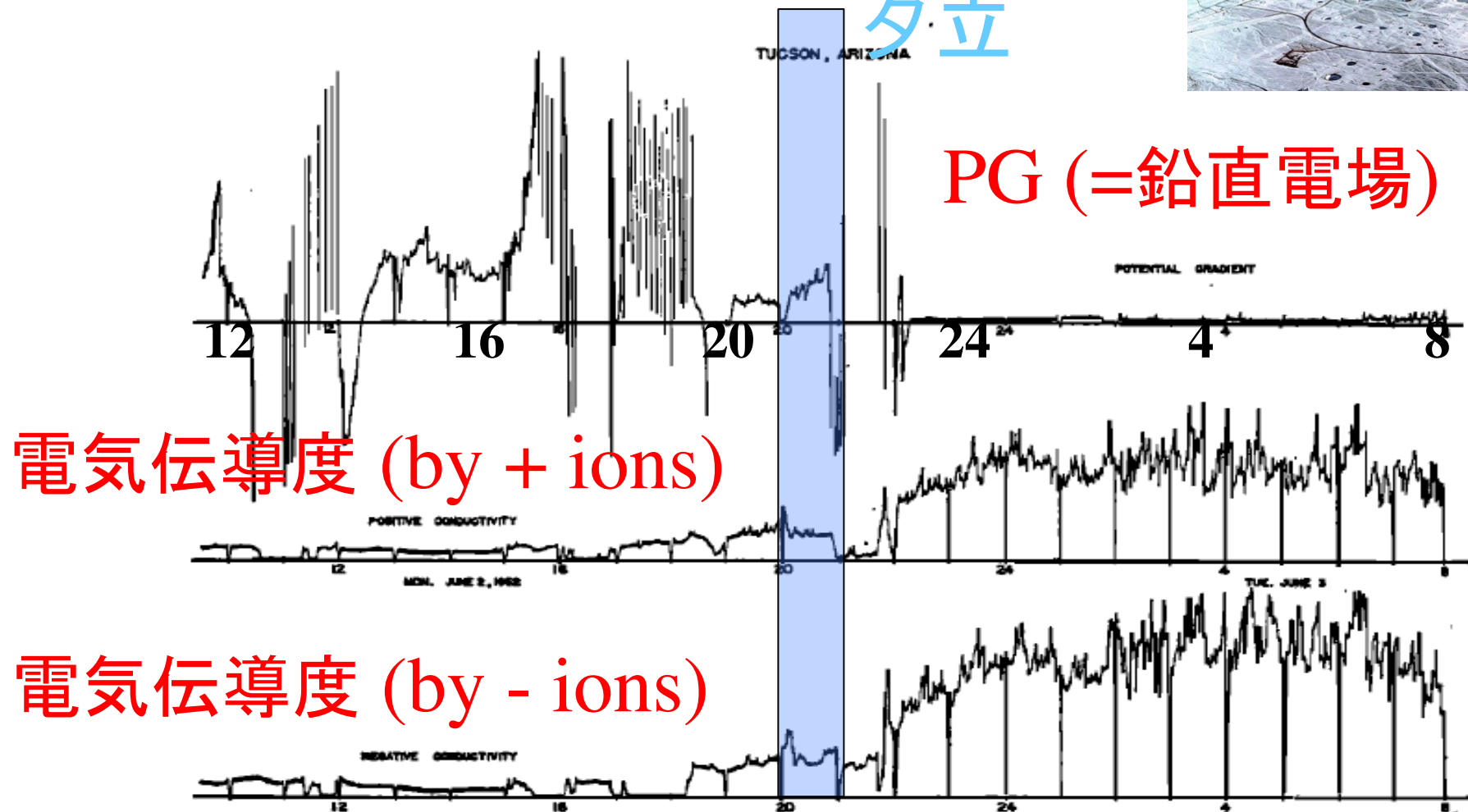


ネバダでの核実験の影響

@Tucson (南東 800km)



夕立



電気伝導度 (by + ions)

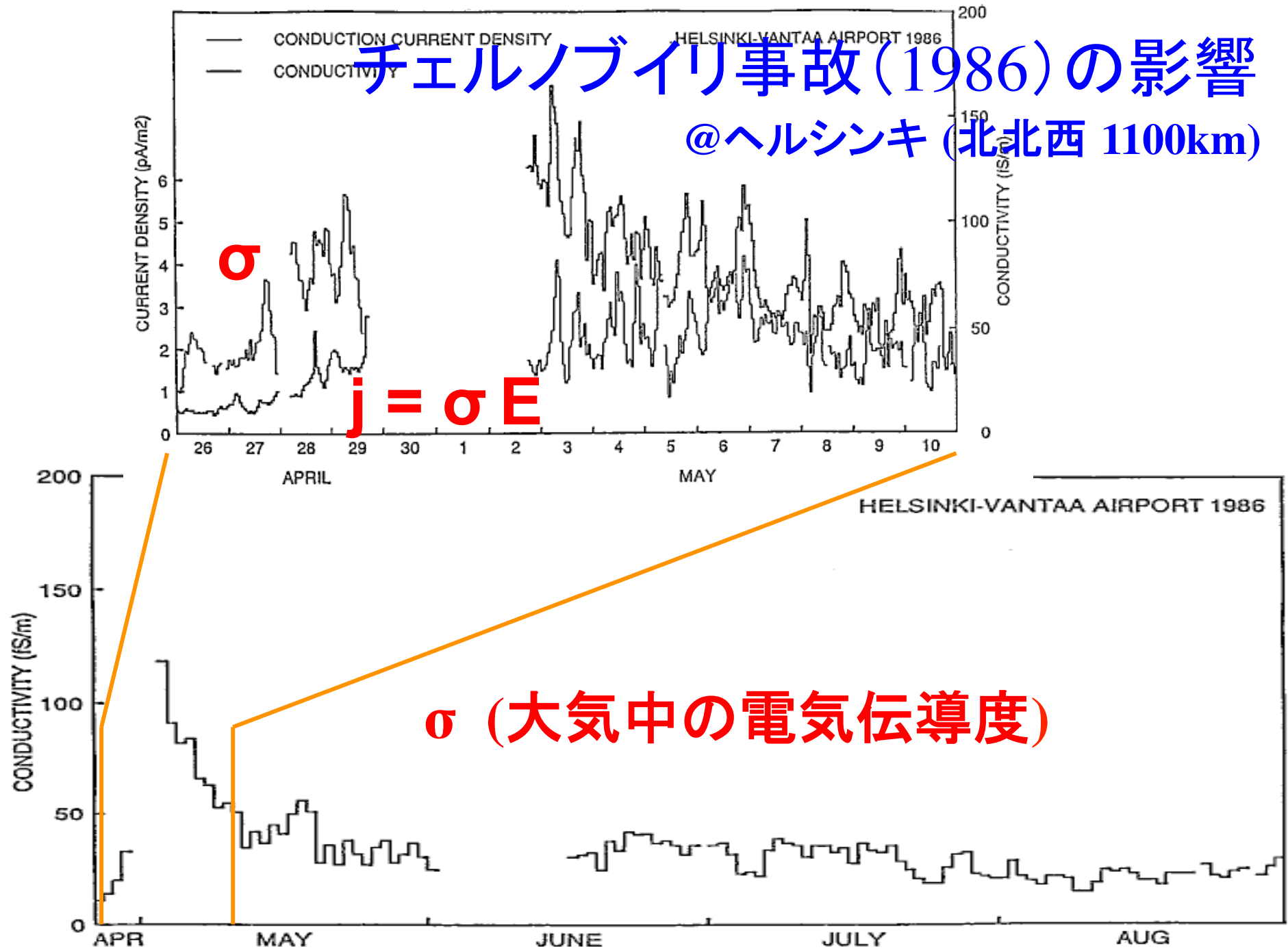
電気伝導度 (by - ions)

FIG. 2—Record of potential gradient, positive and negative conductivity, June 2-3, 1952, at Tucson

⇒ 雨で沈着した

Harris, 1955 (JGR)

チェルノブイリ事故(1986)の影響 @ヘルシンキ (北北西 1100km)

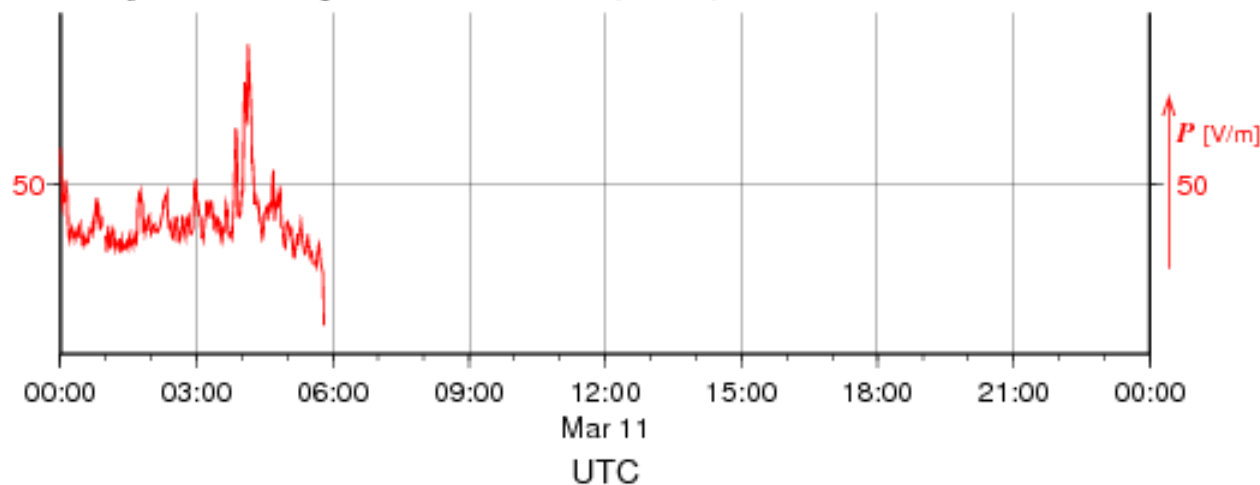


Tuomi, 1988 (Geophysica)

2011年3月11日と14日の柿岡大気電場

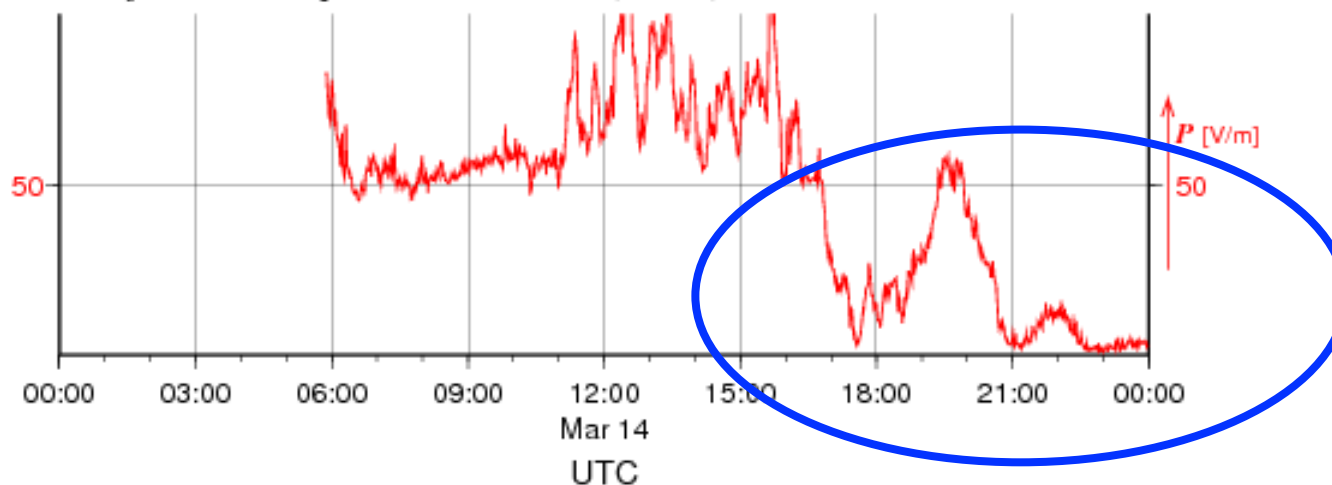
KAKIOKA

2011/03/11 Definitive Atmospheric Electric Data (1-min) – Normal –



KAKIOKA

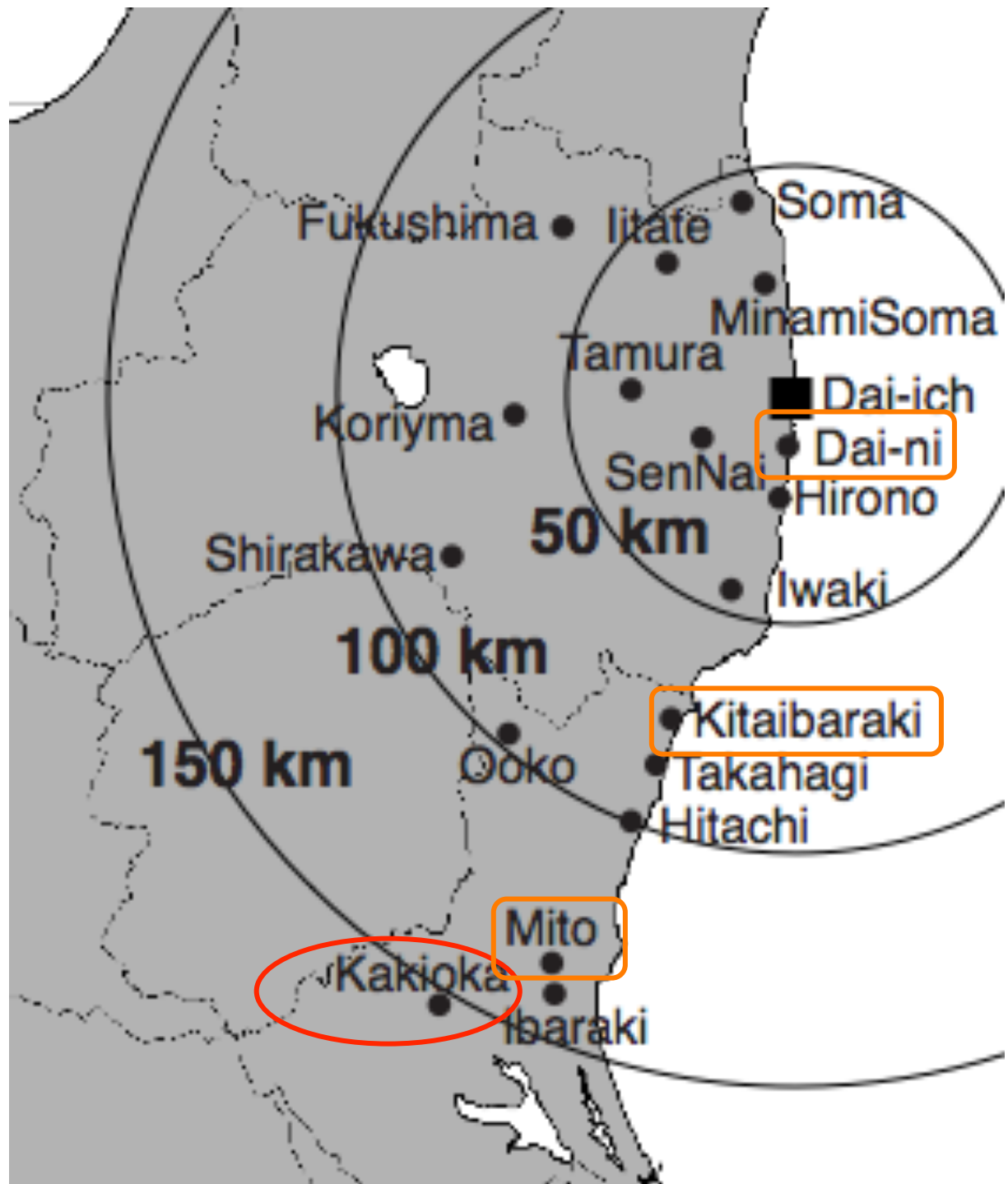
2011/03/14 Definitive Atmospheric Electric Data (1-min) – Normal –

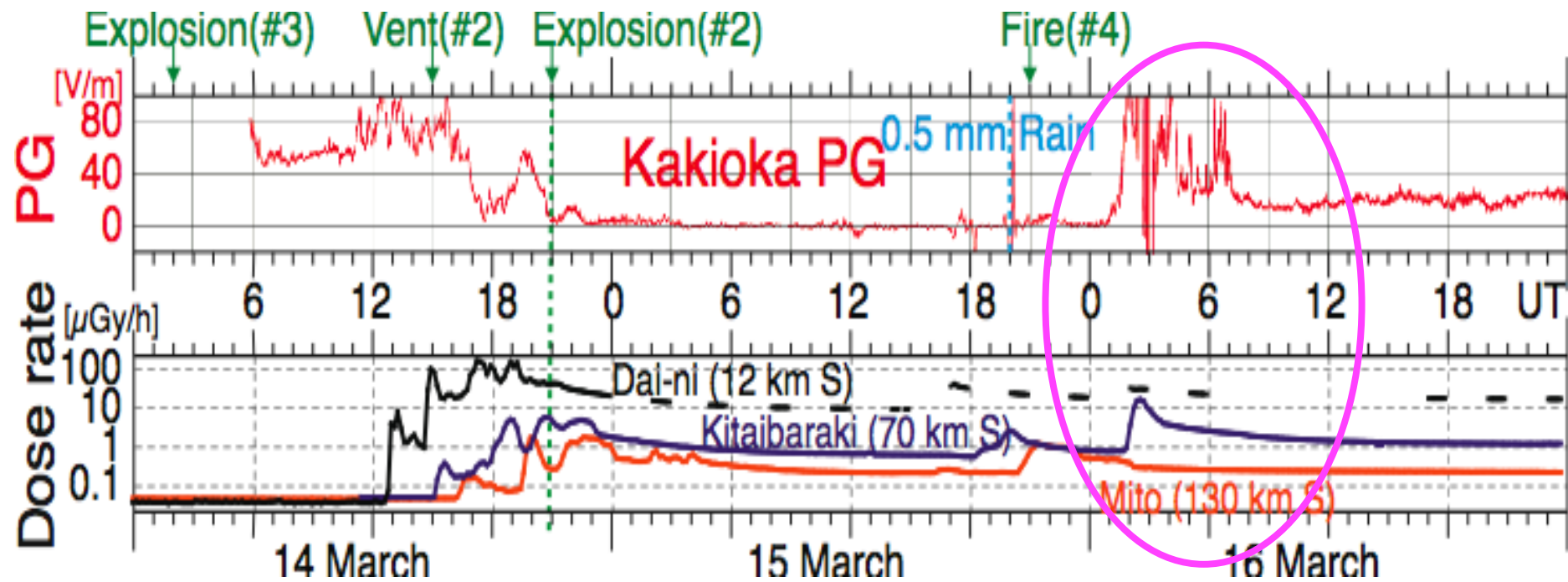


Kakioka Magnetic Observatory
変化の前に停電復旧！

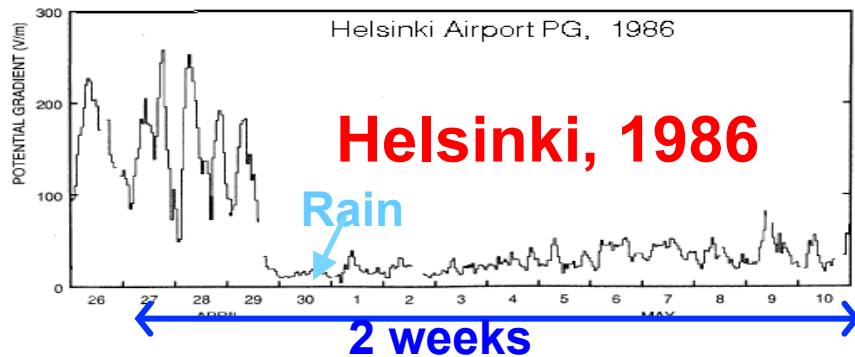
Kakioka Magnetic Observatory

柿岡は、たった 150km :
過去に無い現象まで
見られた

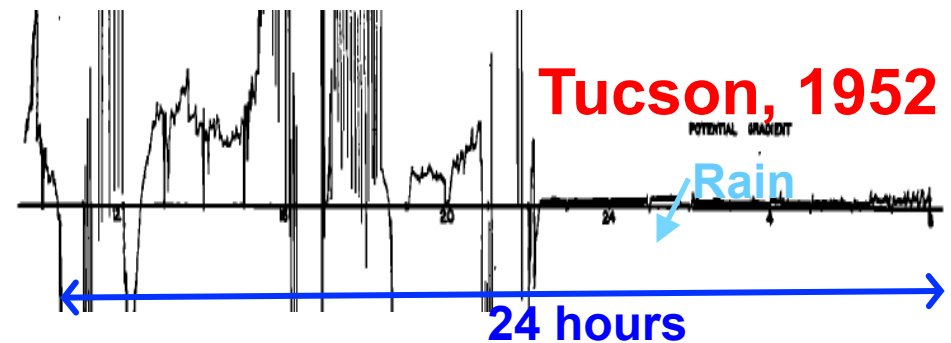




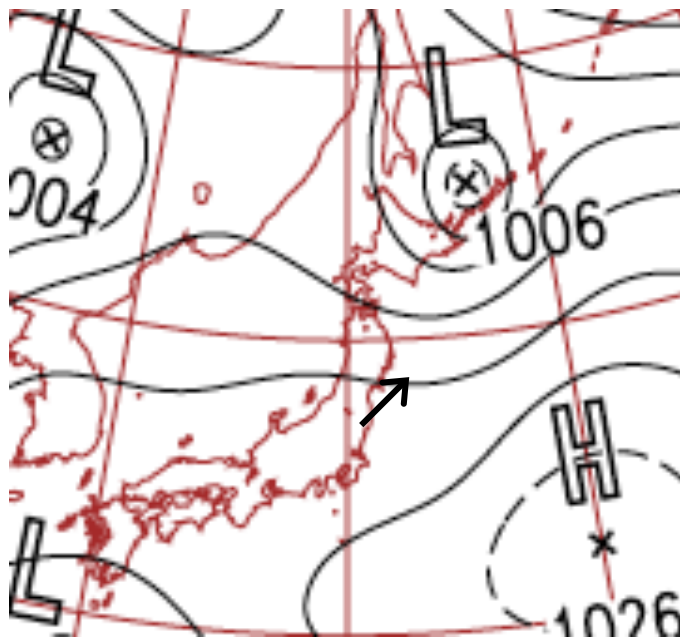
柿岡では電場(PG)が一旦はゼロになったが、翌日再上昇した



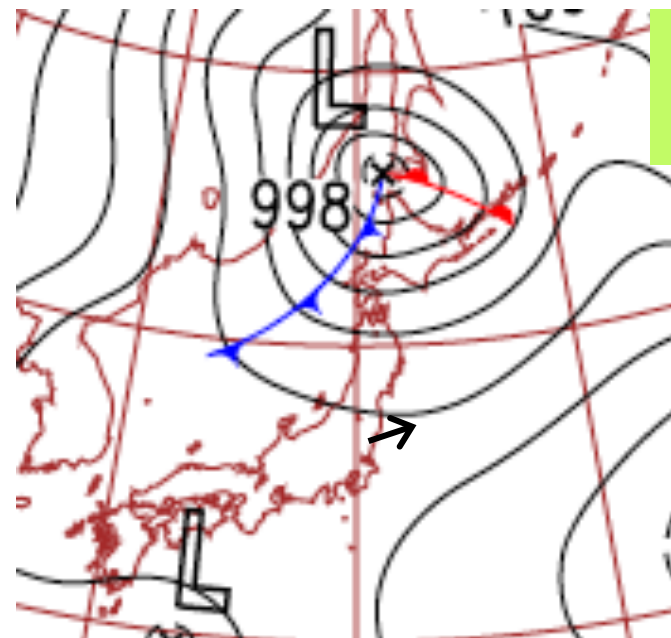
チェルノブイリ事故後(Tuomi, 1988)



核実験後 (Harris, 1955)



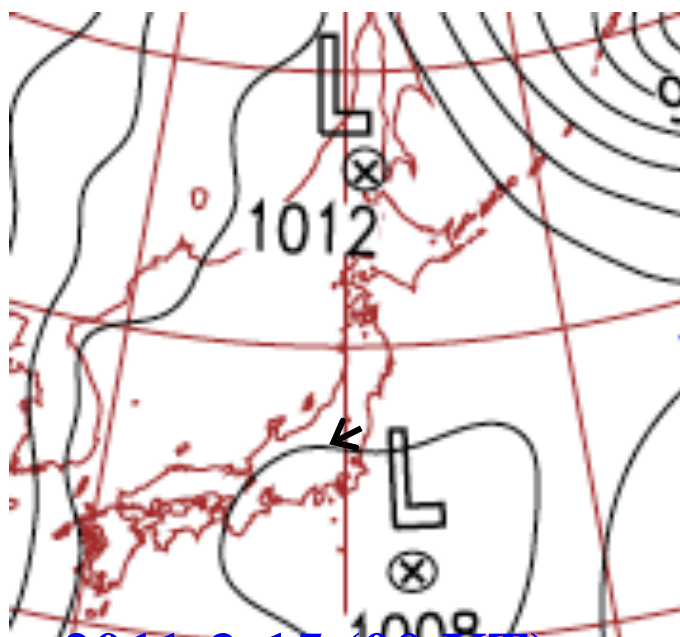
2011-3-13 (00 UT)



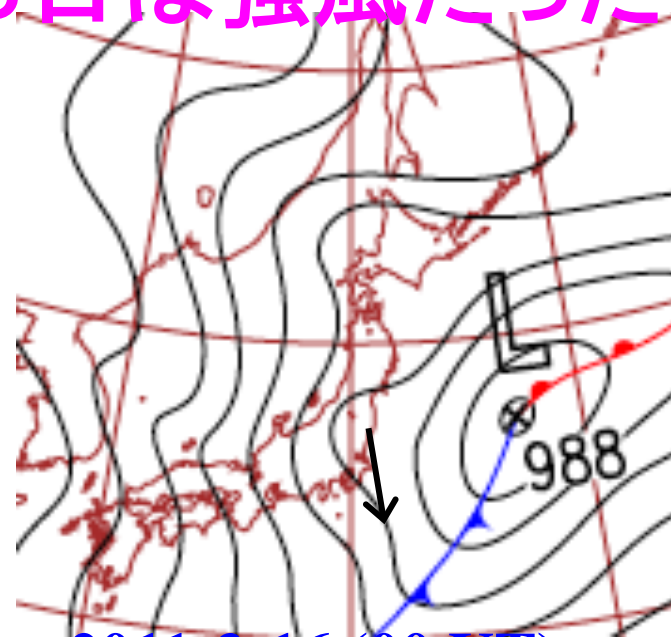
2011-3-14 (00 UT)

skip

16日は強風だった



2011-3-15 (00 UT)

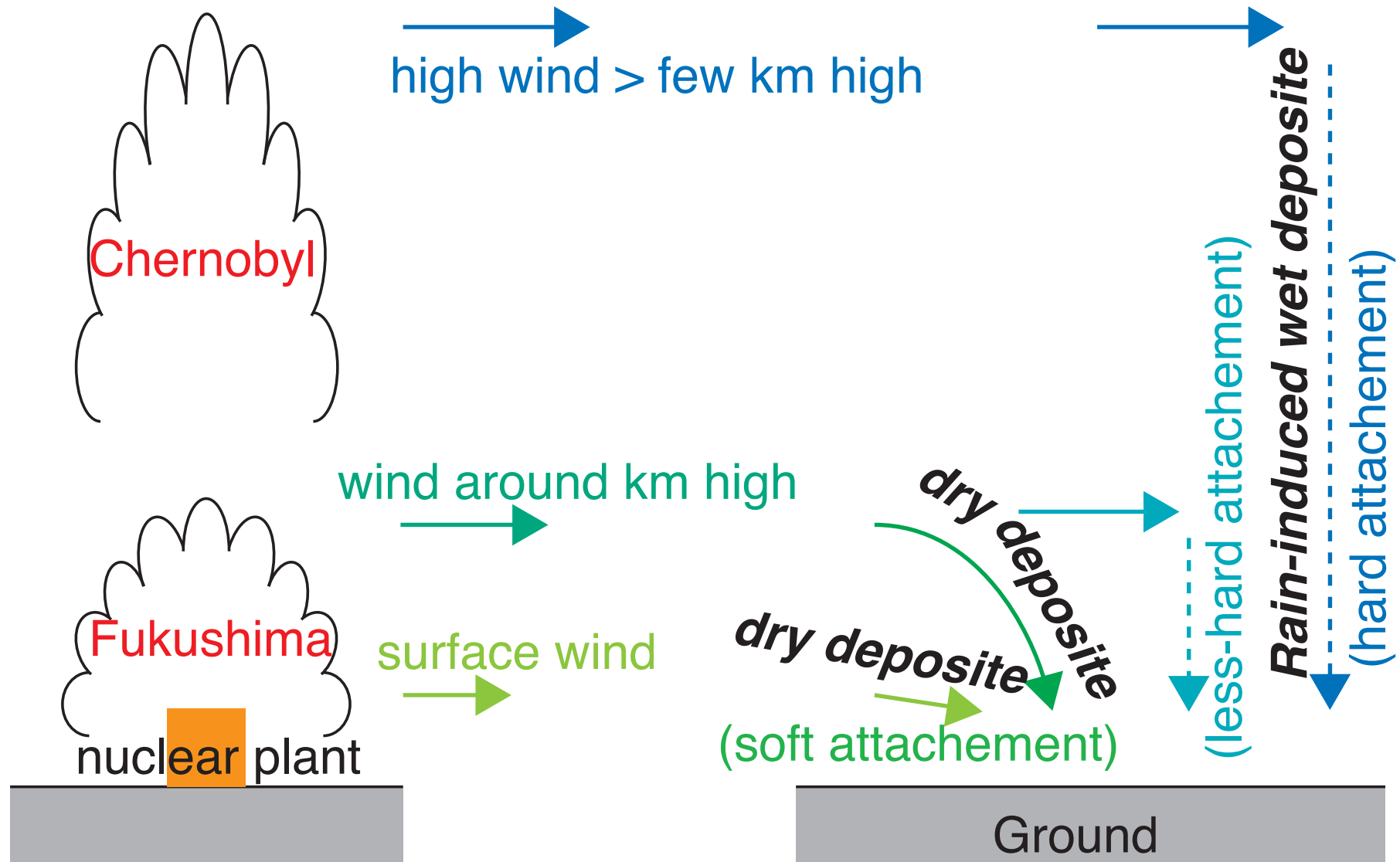


2011-3-16 (00 UT)

大気核実験後の観測例 = **Wet (hard)** / >800km

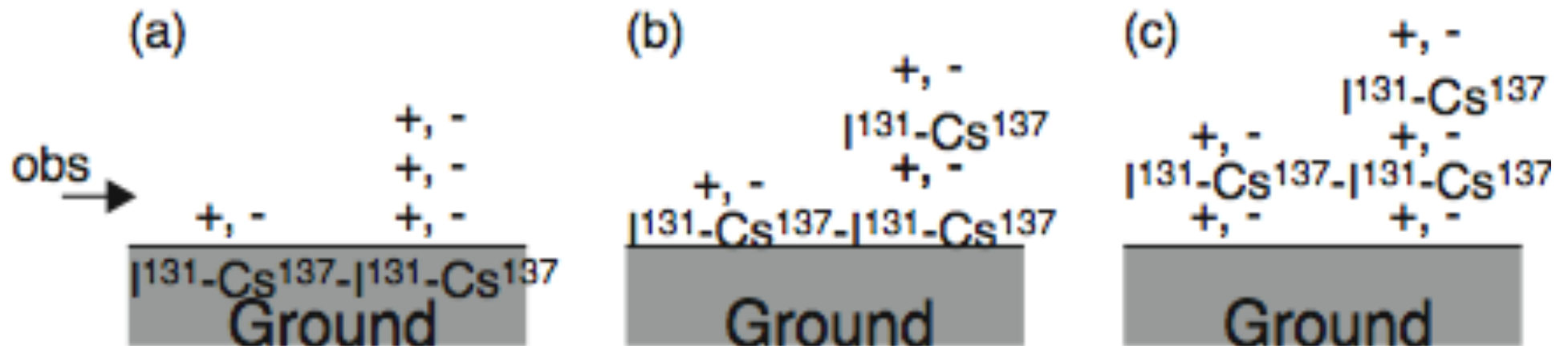
チェルノブイリ事故の観測例 = **Wet (hard)** / >1100km

福島事故では? = **Wet (soft)** + **Dry** / > 100 km

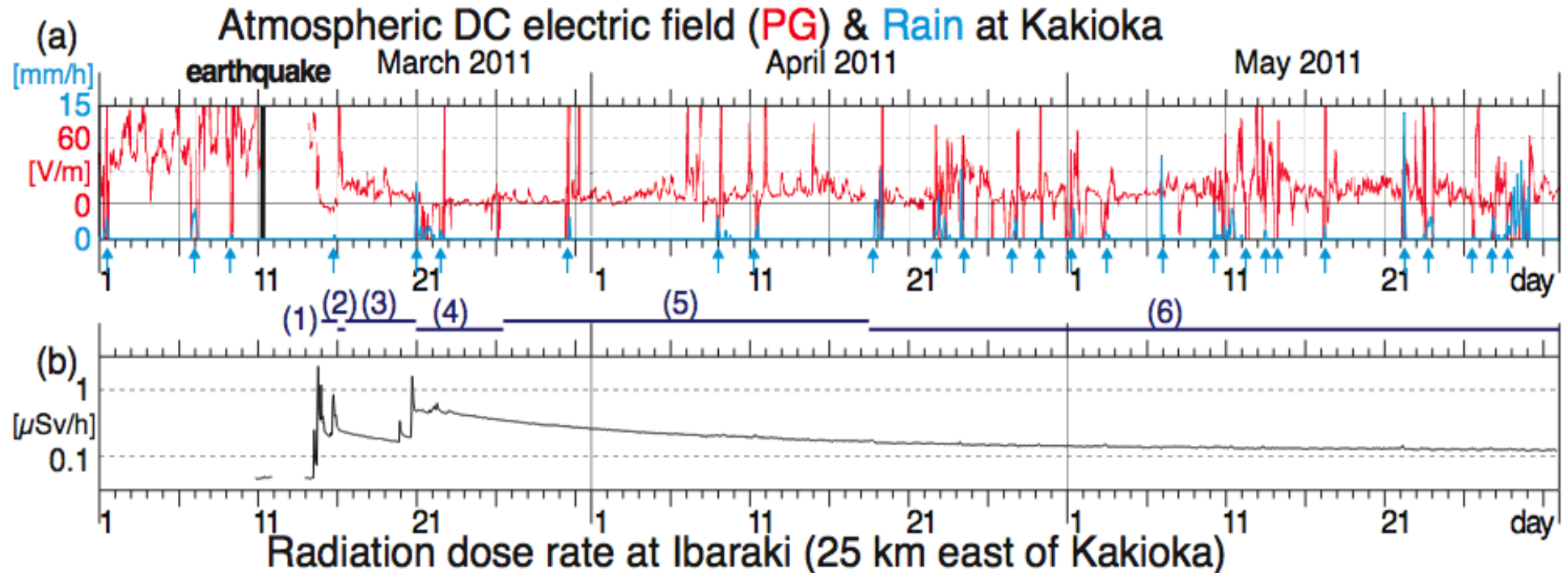


放射能汚染の形態の違い

	migration (地下浸透)	wet (雨沈着) contamination	dry (風浮遊) contamination
transport		high-altitude	surface wind
沈着形態	(a) bind to soil: 化学的に結合	(b) hard press: 地面に付着	(c) soft touch: 浮遊状態
再浮揚	非常に難しい	乾燥後の強風	簡単
電場	0 V/m から回復	0 V/m + 日変化	10-20 V/m



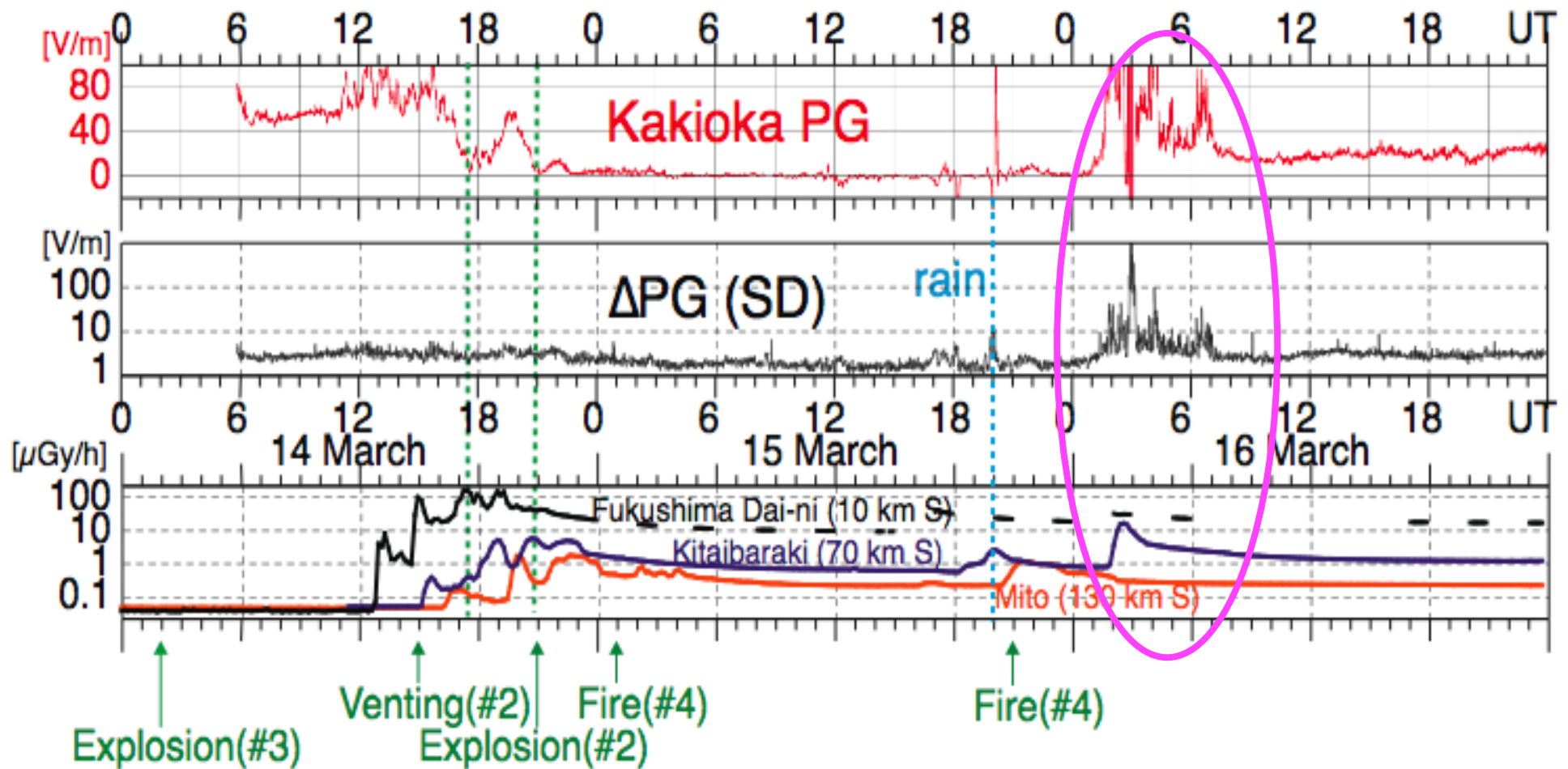
柿岡の電場(PG)の変化 (3ヶ月分)



6つの期間に分けられる

1. 到着 (dry contamination)
2. 強風による大規模再浮揚 (re-suspension)
3. 浮遊状態
4. 沈着 (wet contamination)
5. 昼の風による軽度の再浮揚
6. 再浮揚の終了とPGの緩やかな回復

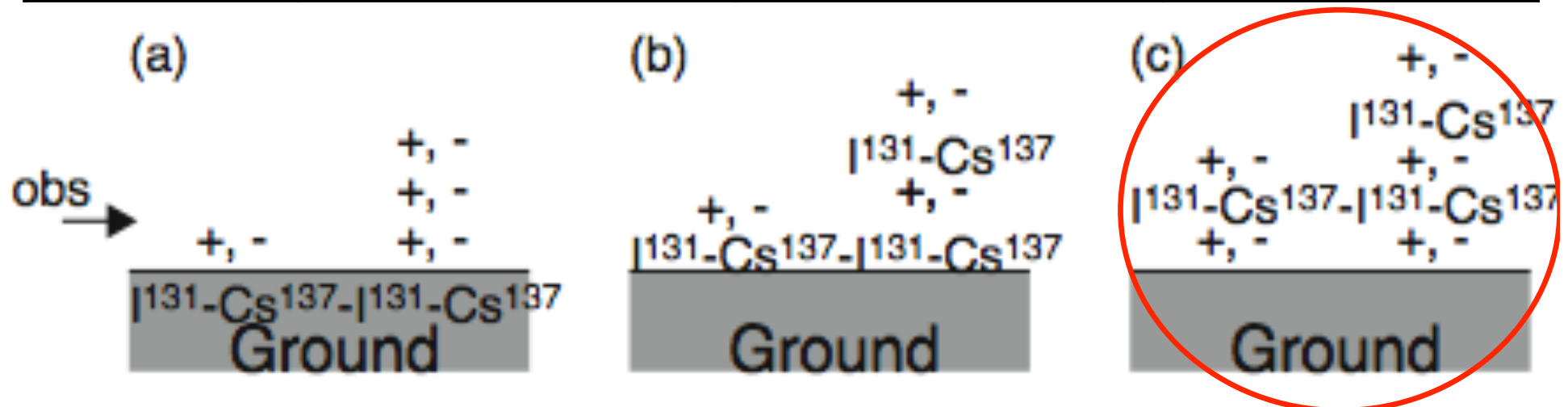
(1)+(2) 飛来と吹き飛ばし (first 3-days)



16日の線量は水戸では減少 $\Rightarrow$ 強風で地上付近の放射性ダストが吹き上げられ、地表の電導度が下がると共に上空の電導度が上がった $\Rightarrow$ 電場 (PG) が大きく回復

dry contamination (浮遊型汚染)

	migration (地下浸透)	wet (雨沈着) contamination	dry (風浮遊) contamination
transport		high-altitude	surface wind
沈着形態	(a) bind to soil: 化学的に結合	(b) hard press: 地面に付着	(c) soft touch: 浮遊状態
再浮揚	非常に難しい	乾燥後の強風	簡単
電場	0 V/m から回復	0 V/m + 日変化	10-20 V/m

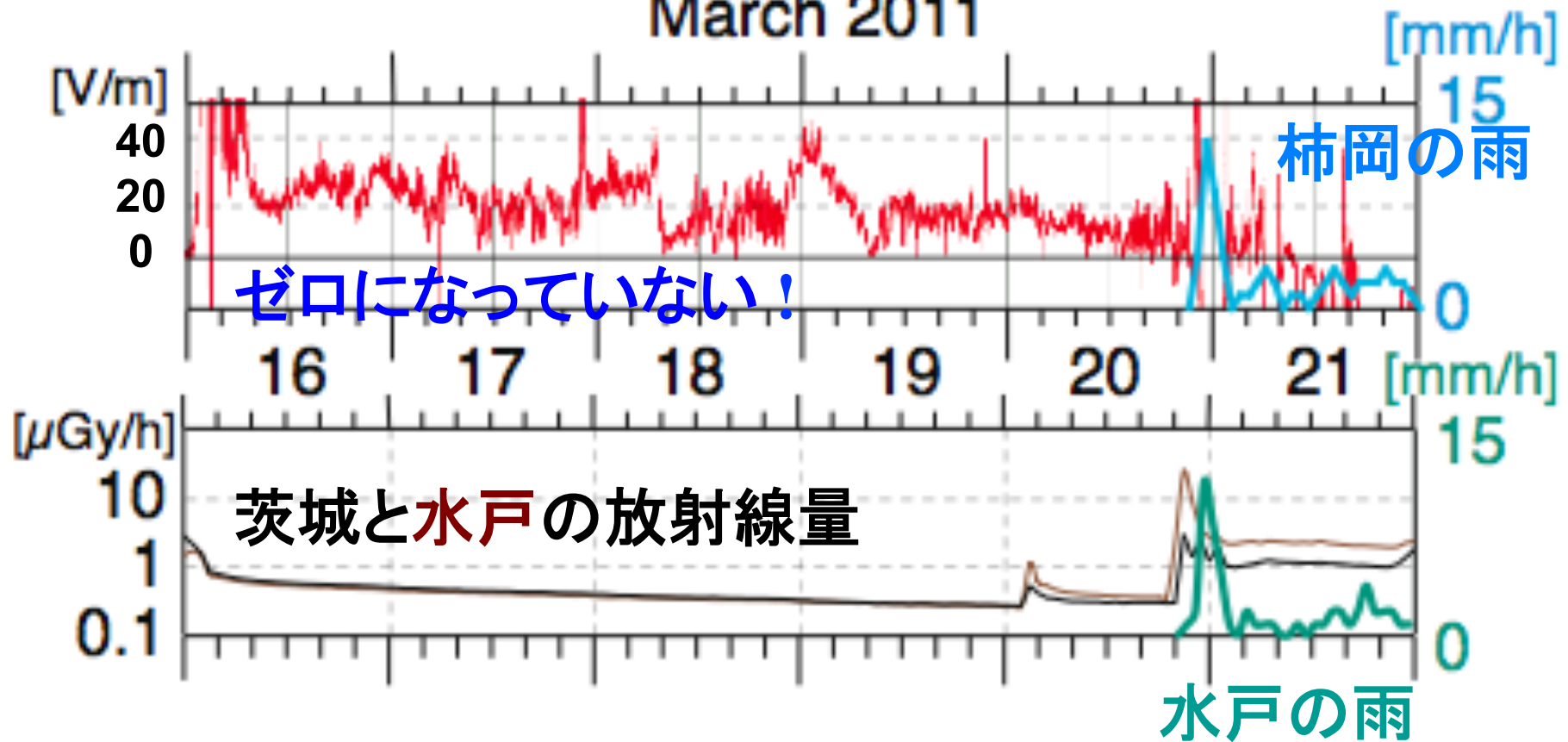


(3) 軽めの浮遊型汚染 (next 5-days)

PG at Kakioka & Rain at Kakioka & at Mito

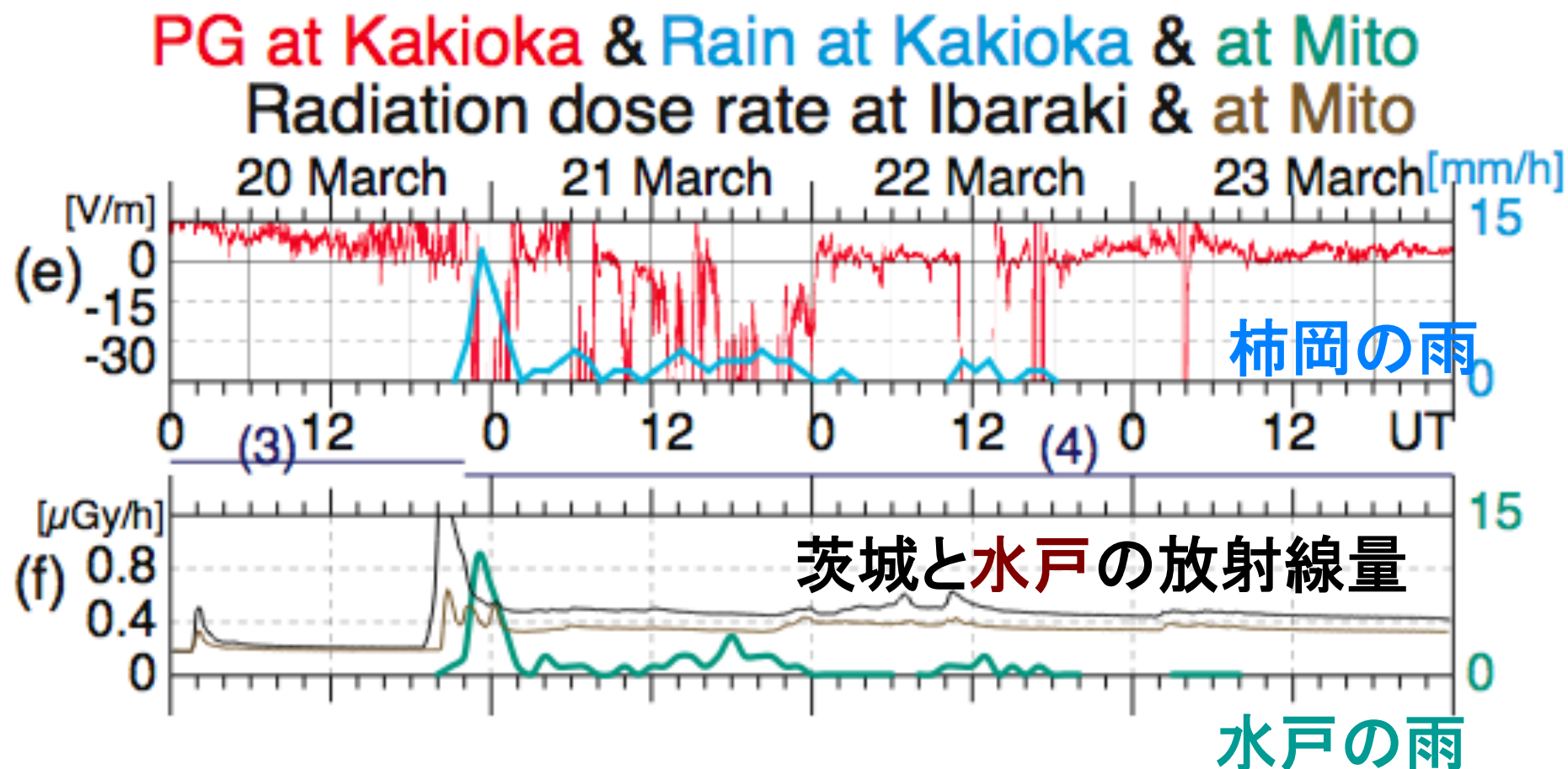
Radiation dose rate at Ibaraki & at Mito

March 2011



⇒ かなり吹き飛ばされたたので、伝導度が下がった

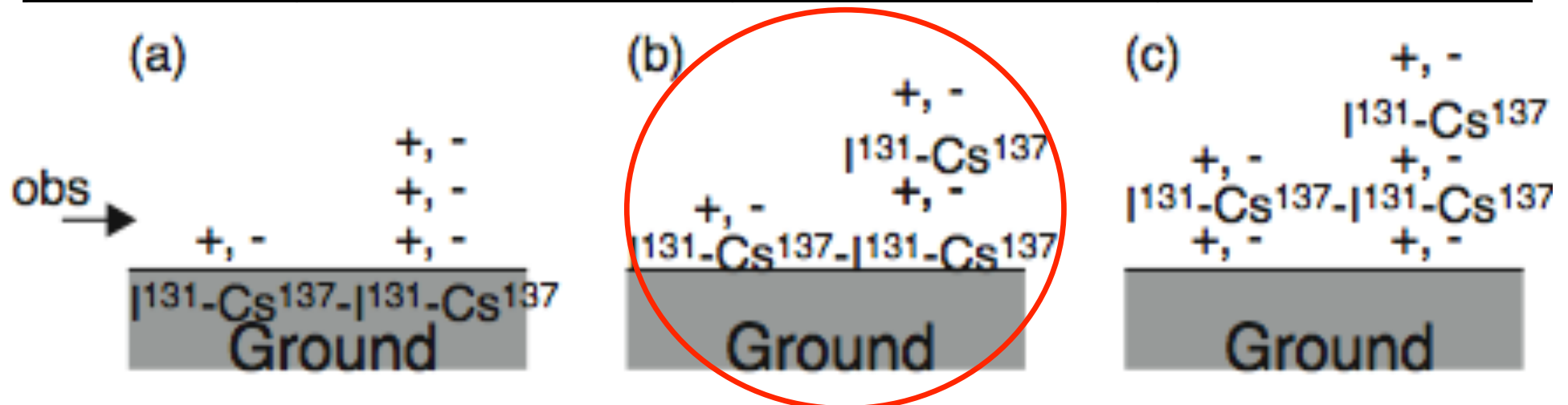
(4) 雨による沈着（初の本格降雨）



⇒ 大量に沈着したので、電導度が上がった

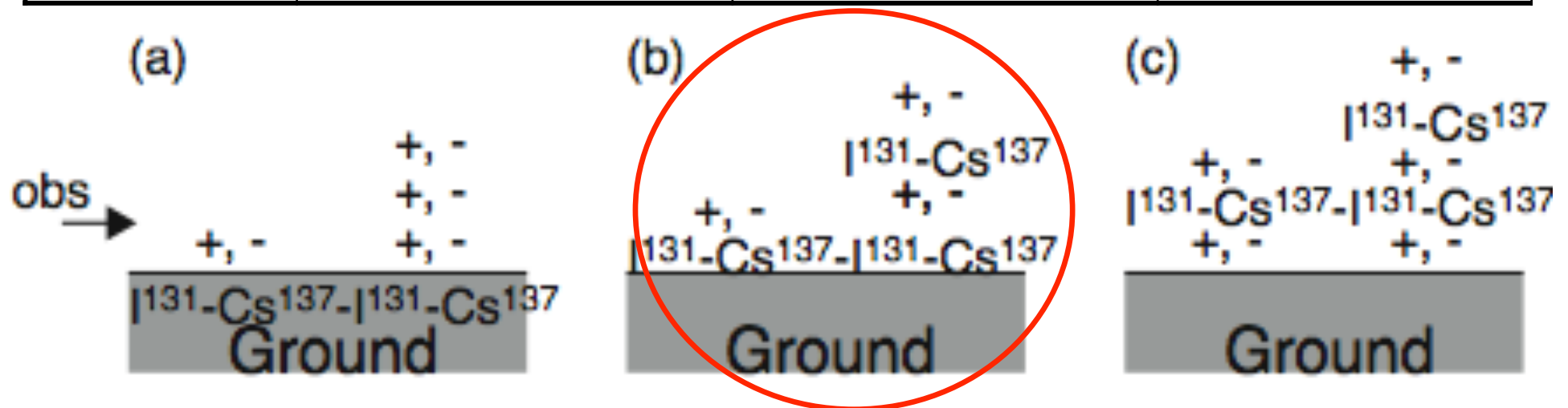
wet contamination (沈着型汚染)

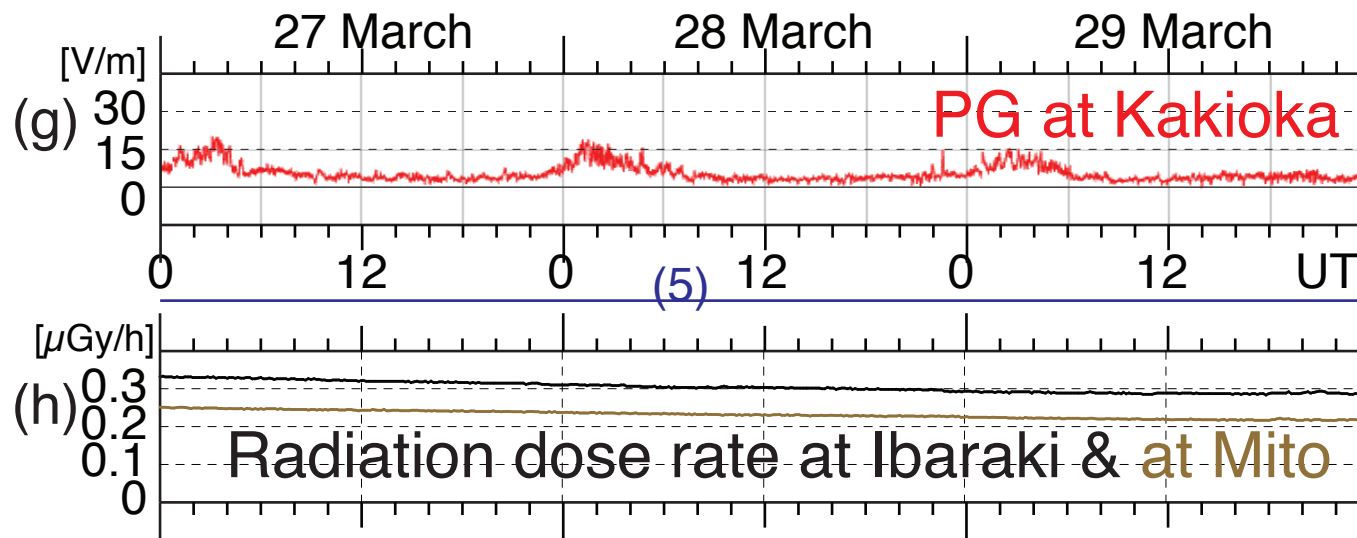
	migration (地下浸透)	wet (雨沈着) contamination	dry (風浮遊) contamination
transport		high-altitude	surface wind
沈着形態	(a) bind to soil: 化学的に結合	(b) hard press: 地面に付着	(c) soft touch: 浮遊状態
再浮揚	非常に難しい	乾燥後の強風	簡単
電場	0 V/m から回復	0 V/m + 日変化	10-20 V/m



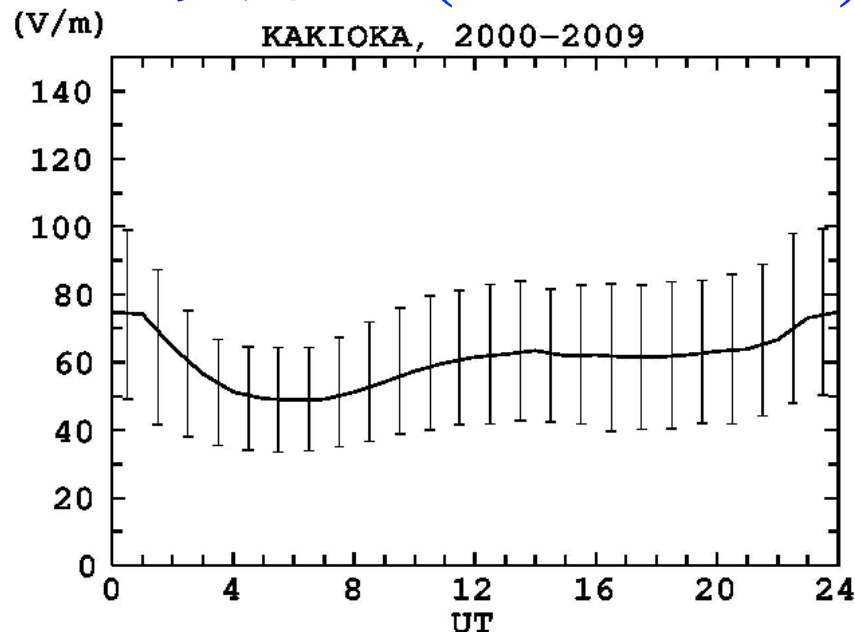
re-suspension (沈着後の再浮揚)

	migration (地下浸透)	wet (雨沈着) contamination	dry (風浮遊) contamination
transport		high-altitude	surface wind
沈着形態	(a) bind to soil: 化学的に結合	(b) hard press: 地面に付着	(c) soft touch: 浮遊状態
再浮揚	非常に難しい	乾燥後の強風	簡単
電場	0 V/m から回復	0 V/m + 日変化	10-20 V/m

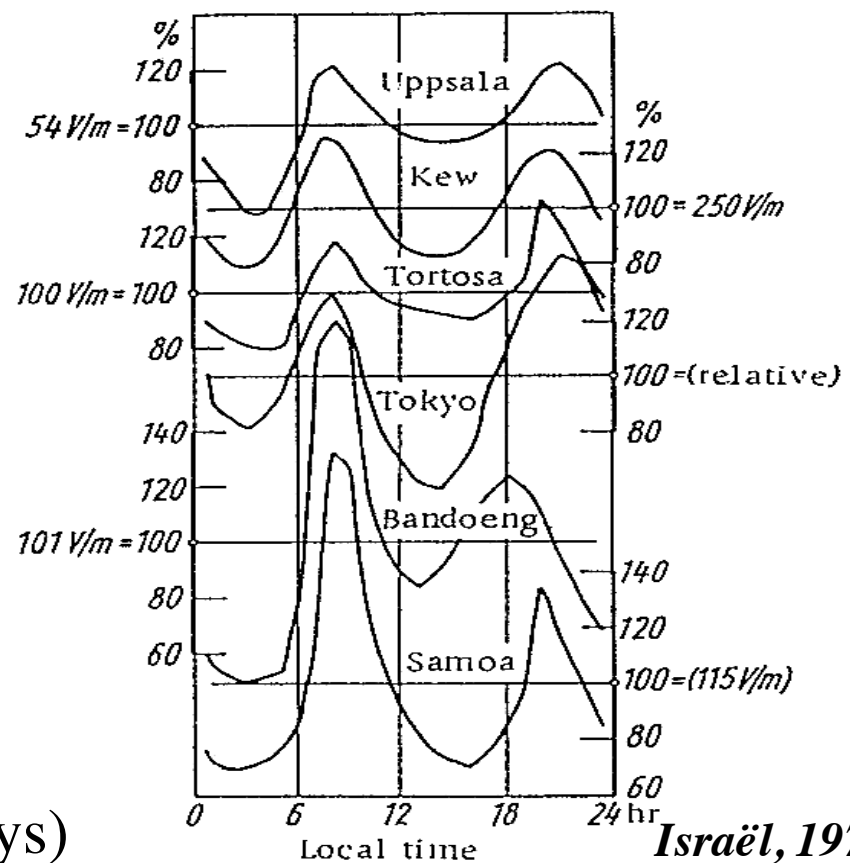




(5) 日変化@ピーク時刻
がやや異なる (LT=UT-9h)

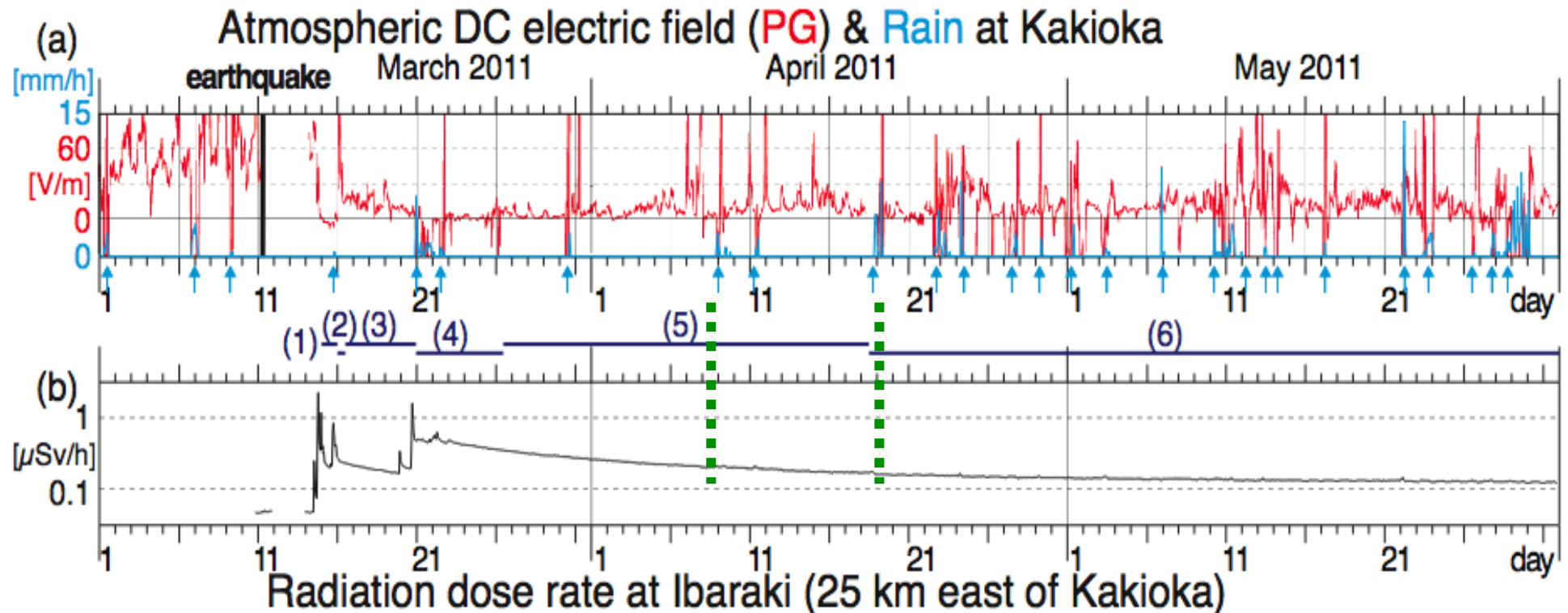


cf. 2000-2009 statistics (quiet days)



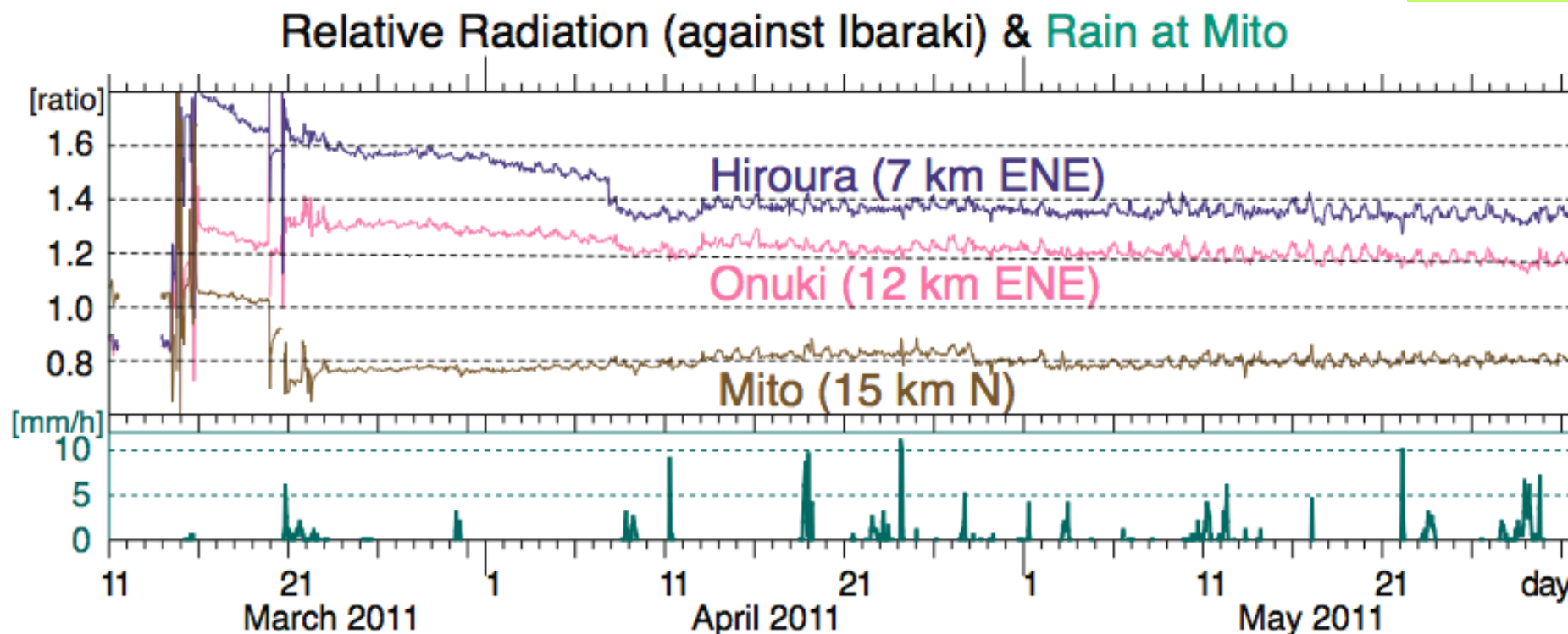
Israël, 1973

(6) 放射能の緩やかな再分布（1ヶ月後～）



夜間の風がないときの基本値がゆっくりと回復開始。
ただし、それは 8 April, 18 April, 10 May の雨でリセット
⇒ 雨で樹上から落ちた可能性が高い？

放射能の再分布を線量計で見ると skip



ランダムな風向きによる再浮揚放射能の移動

⇒ Similar to diffusion process

⇒ 高汚染地域から低汚染地域への移動が予測される

⇒ ratio approaches unity until ~ 20 April

⇒ 大気電場による予想は正しかった！

Summary-1

3月15日の $PG \approx 0V/m$ は地表近くに漂う放射性ダストによる。

3月16日の一時的な PG回復は非汚染地域からの強い風によって放射性ダストが吹き上がった。

3月16～20日の $PG \approx 20-30V/m$ は、吹き飛ばされて汚染が減ったから。

3月21日の降雨により、大気中に漂っていた放射性物質が地表に沈着して $PG \approx 0V/m$ となった。

3月末から始まる日変化は、海風は乾いた沈着物の再浮揚による。

4月に時々 $0V/m$ にリセットするのは、樹冠から放射性物質が落ちるため。

4月半ば以降の日変化の弱化と夜間値の回復は、放射性物質が地下に移動したため。

再浮揚や拡散的再分布は4月末（事故後50日ほど）まで頻繁に起こっていた。

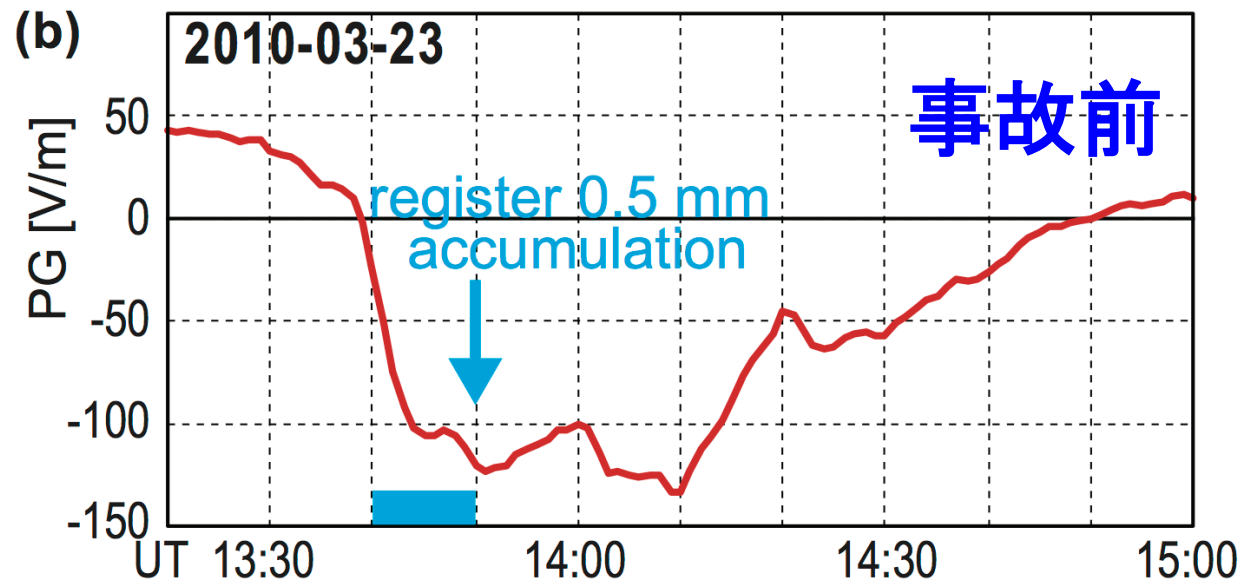
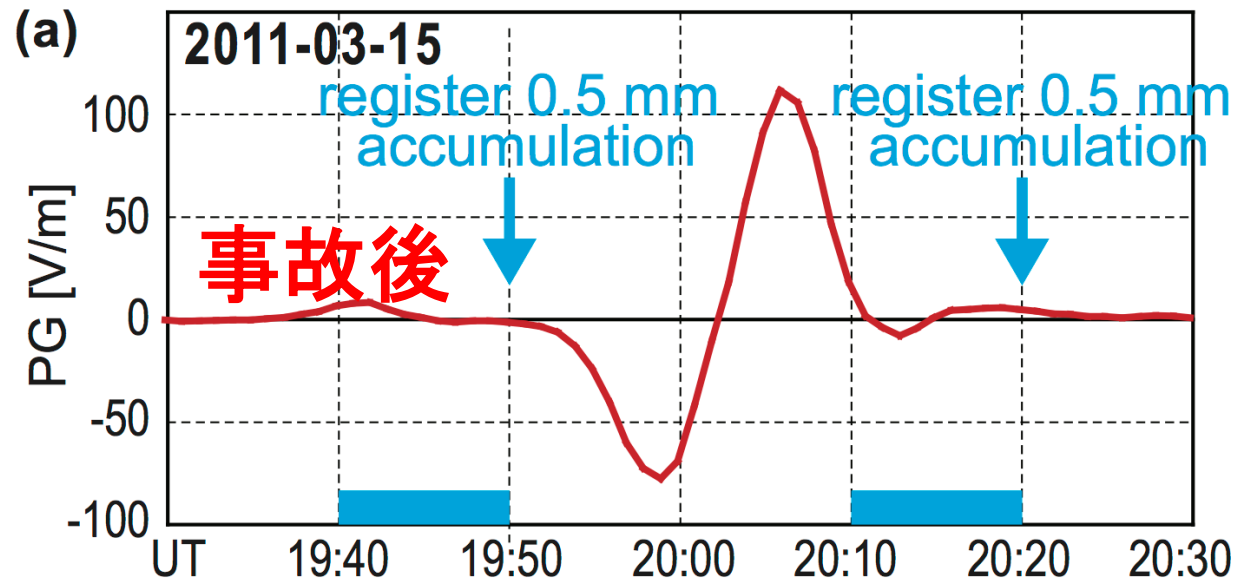
雨天時の電場(PG)への影響は？

柿岡PG値から、電導度の上昇は地表付近で10倍程度、上空で3倍程度

⇒ 電導度が高くなれば、何らかの電荷遮蔽が起こるのでは？

問題は変動が激しくて、信頼度に不安が残ること
しかし、解析してみる価値はある

PG around light rain



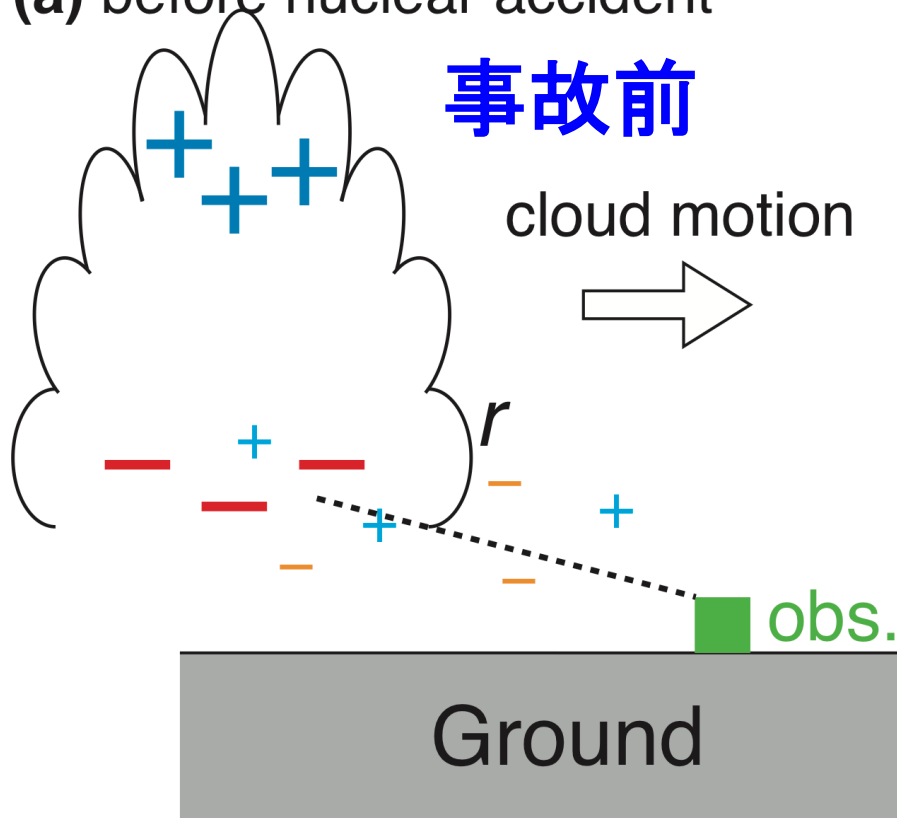
電荷分布を考えると、影響はありうる

追加電荷が雲電荷に反応して静電的（誘電体的）に遮蔽するのでは？

追加電荷が電流を素早く流して雲内電荷の減衰が早まるのでは？

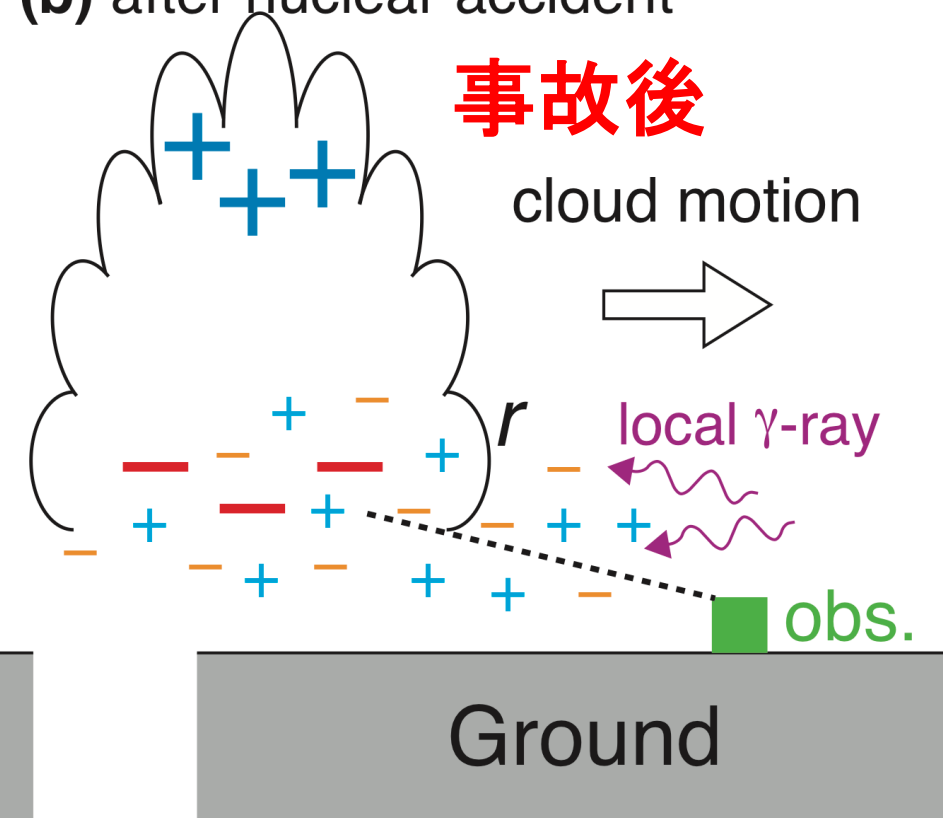
(a) before nuclear accident

事故前



(b) after nuclear accident

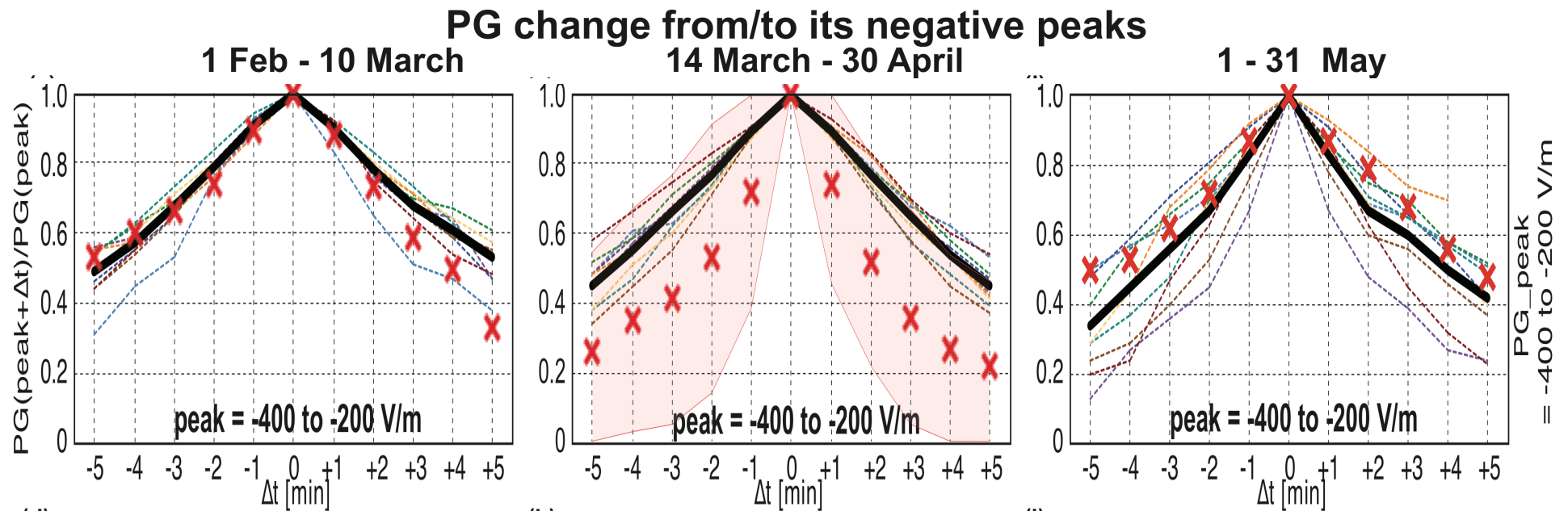
事故後



⇒ 強い雨だと浮遊物が洗い流されるから、弱い雨で影響が最大の筈

実際、PGのピーク値前後の時定数に変化

2011年の放射能浮揚期間（3月14日～4月下旬）だけ、短い時定数 ⇒ 雲から少しでも離れると電場（PG）が急減少する（予想通り）



ピーク値が -200 ~ -400 V/m の場合

× : 2011年

太実線: 2011年を除いた平均

どのPGピーク値(雨雲の強さ)で影響大か？

PG のピーク値が $-100 \sim -400$ V/m で影響が最大

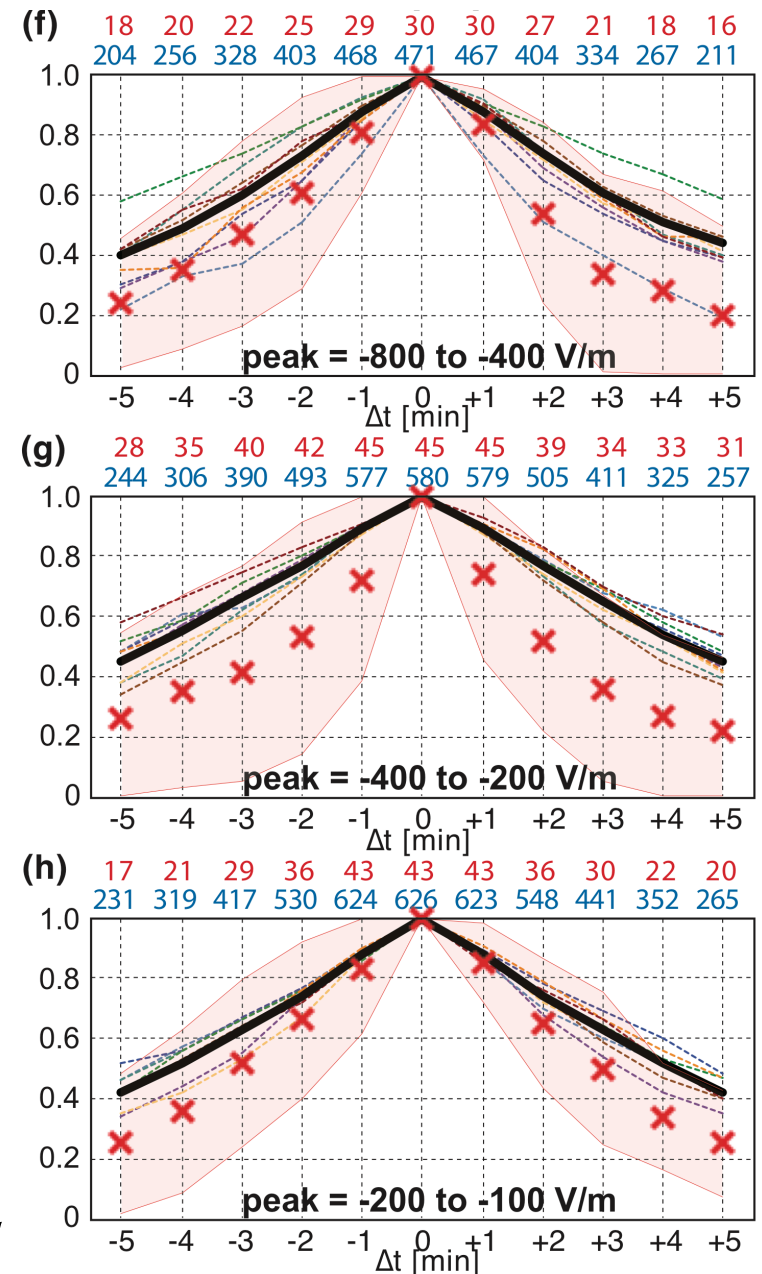
⇒ 弱い雨雲に対応 (予想どおり)

しかも、rise も decay も対称的に
時定数が短くなっている ⇒ 電流の
減衰では説明がつかない (遮蔽シ
ナリオをサポート)

(3月14日～4月下旬)

× : 2011年

太実線: 2011年を除いた平均

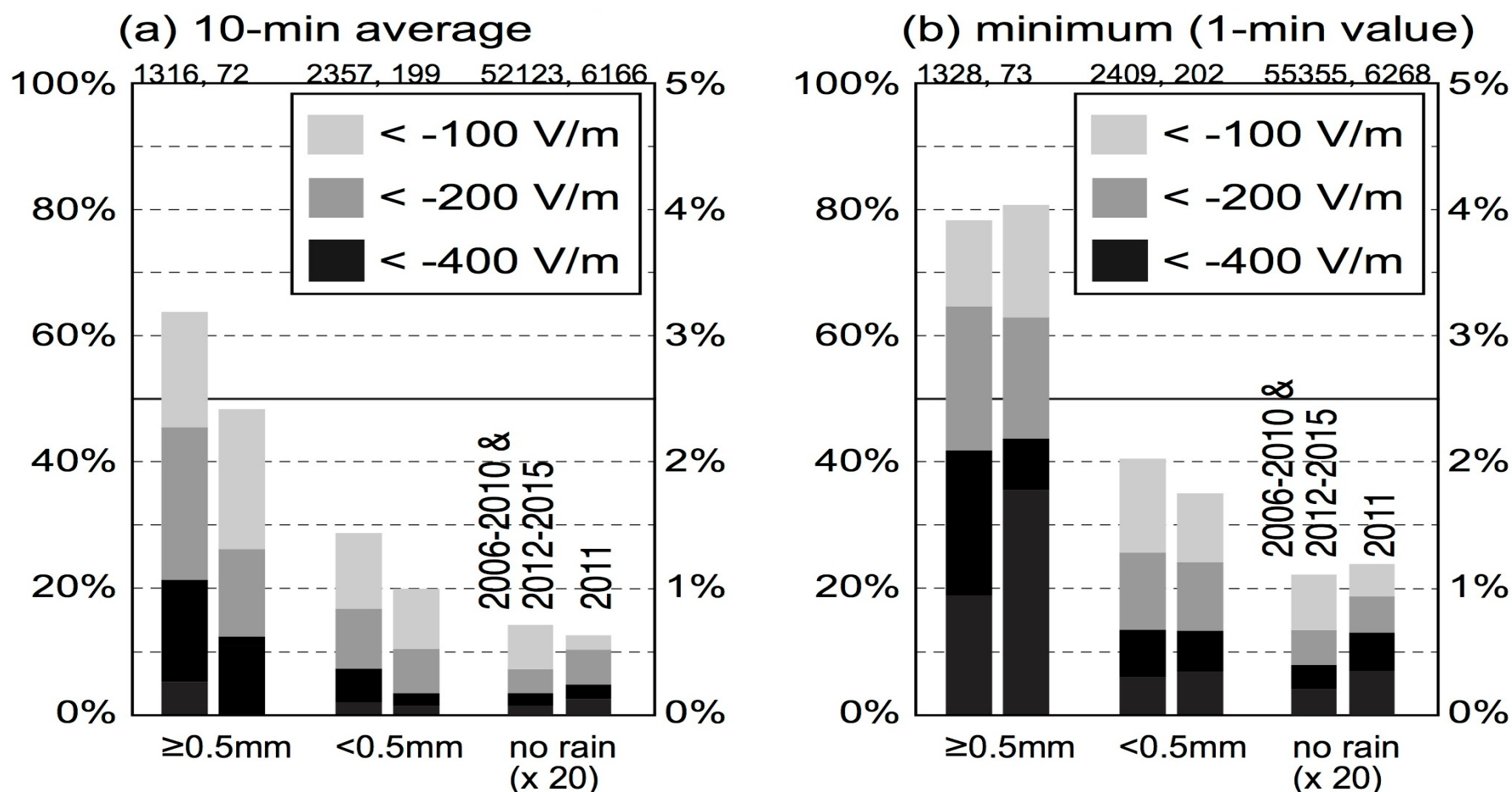


実際、小雨下で2011年の|PG|平均値が小さい

しかも、ピーク値ではなく、平均値のみ：

⇒ 雲内電荷の減衰では説明がつかない（遮蔽シナリオをサポート）

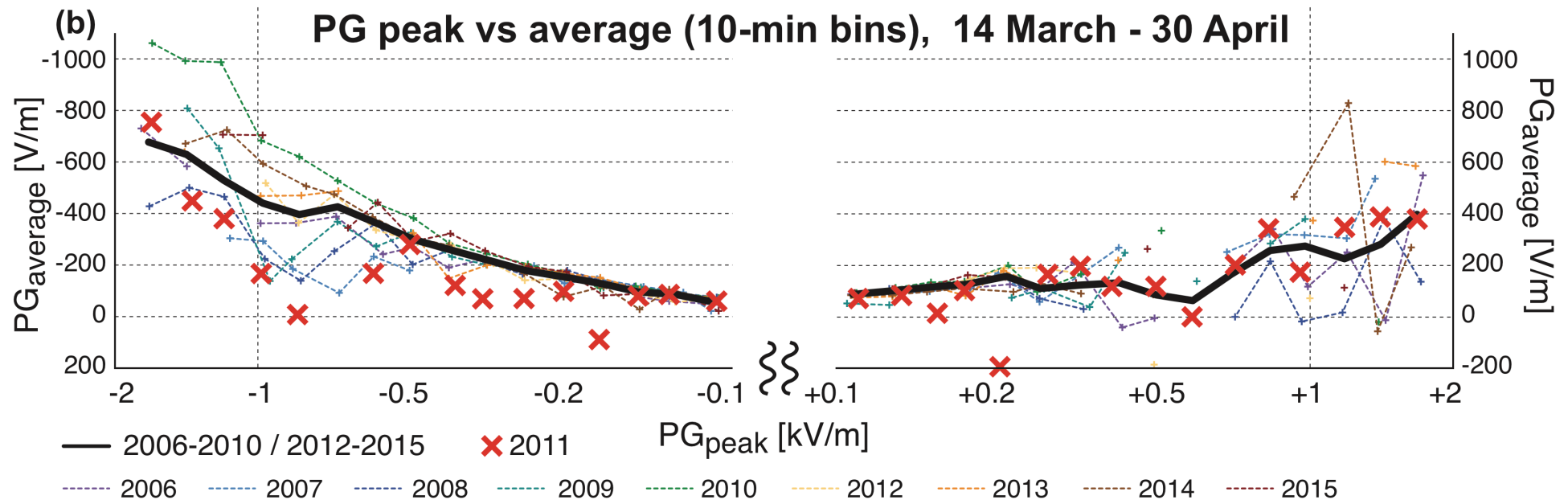
skip



左と右のバーはそれぞれ2011年以外と2011年の平均

結果として平均値とピーク値の比も変化

skip



< -500 V/m : 各年のばらつきが大きいので確定的ではない
-200 ~ -400 V/m : たしかに 2011年だけが突出して低い

Summary-2

浮遊放射能による大気電場（地上のPG）の変化は雨天時の上向き電場でも見られる（らしい）

変化が顕著なのは、小雨並びに雨の降る前や降ったあと20分程度で、ピーク値が-100~-400V/mの場合だった

変化はPGのマイナスピークの前後対称的に時定数が短くなるという形で現れ、高くなった伝導度で雲の電荷をシールドした効果として解釈できる。

影響は4月末で終わり、放射能の再浮揚の時期と合致する

結論-1

地上の大気電場（PG）観測から dry contamination と再浮揚を初めて検知した。

線量計ネットワークと組み合わせることで放射能の他の動きも検知できた。

再浮揚や拡散的再分布は4月末（事故後50日ほど）まで頻繁に起こっていた（大気電場でないと分からなかった）。

現時点で、これほどのリモート観測が出来るシステムは存在しない。その意味では全ての原発の回りに欲しい。

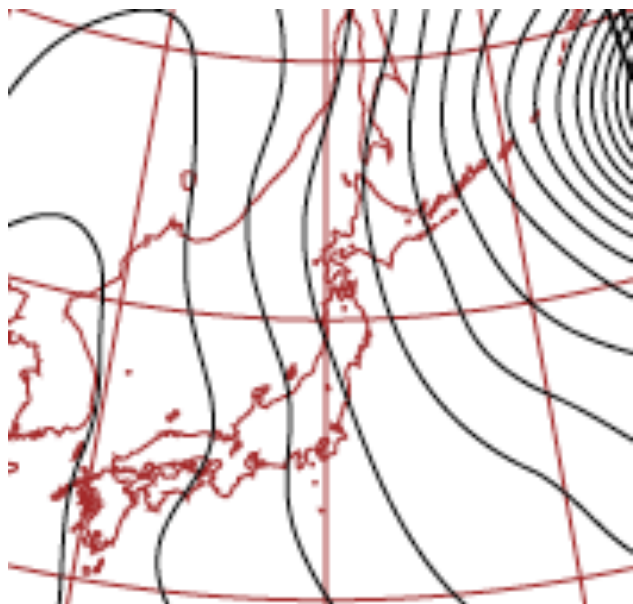
結論-2

（にも関わらず、気象庁は震災の3ヶ月前に女満別の電場観測を終了、研究者も皆無に近い）

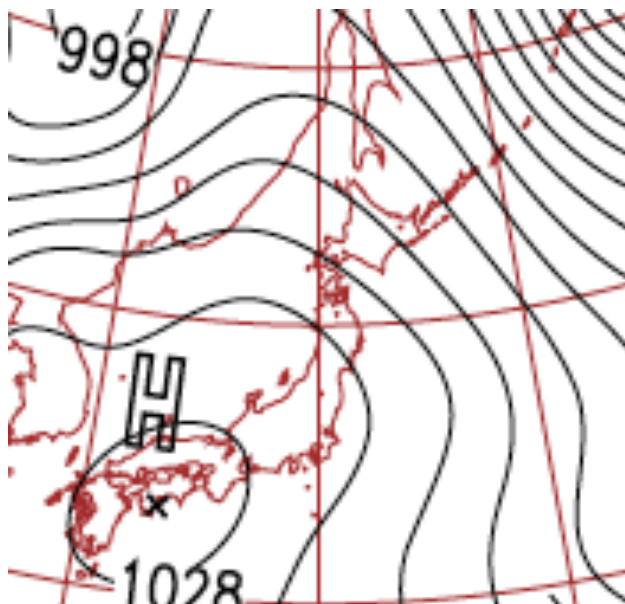
⇒ これらの解析は竹田さんがいなかったら始まらなかった

お陰で今では電場観測の必要性が（気象庁でも）認められている

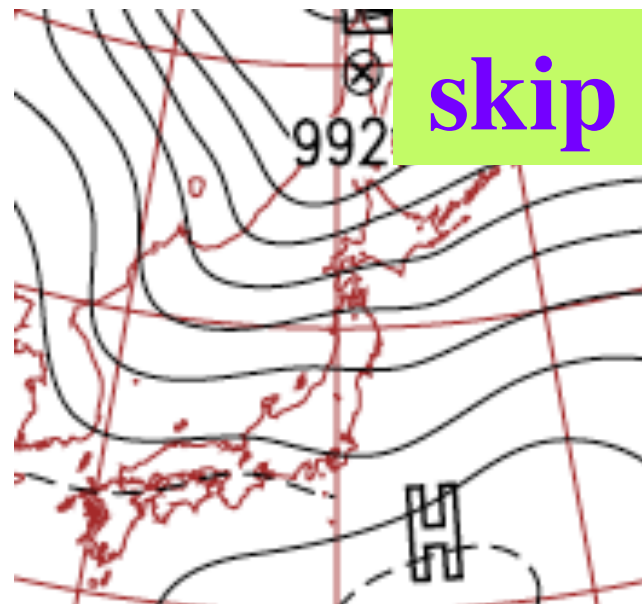
古い学問を守ってくれた竹田
さんに感謝を



2011-3-17 (00 UT)

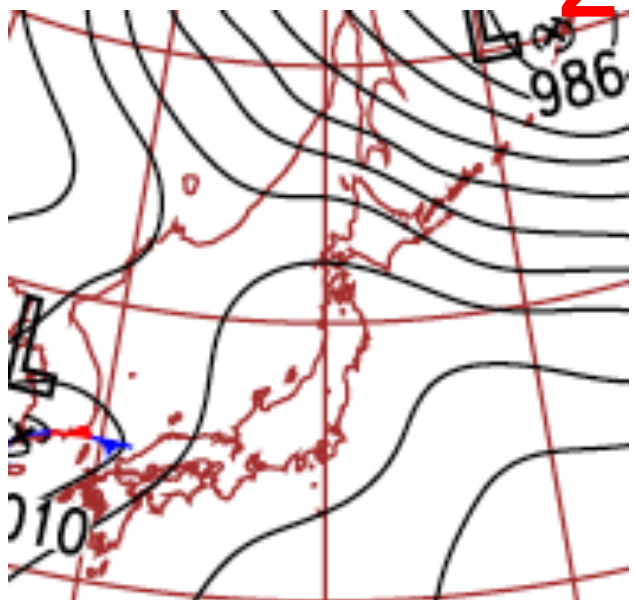


2011-3-18 (00 UT)

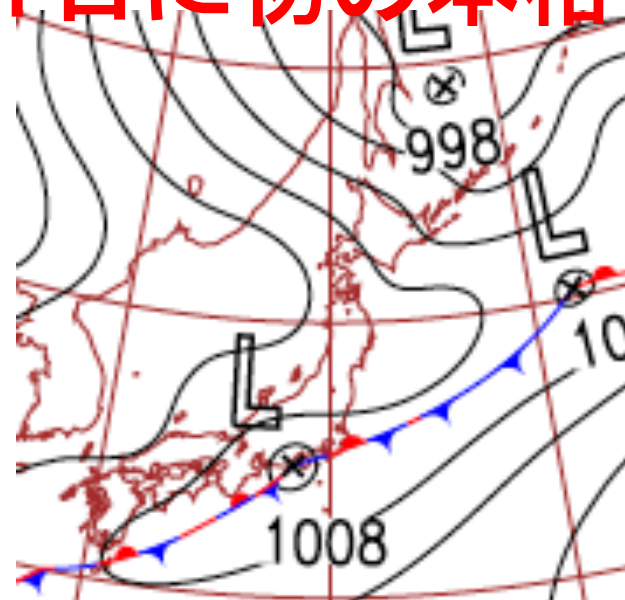


2011-3-19 (00 UT)

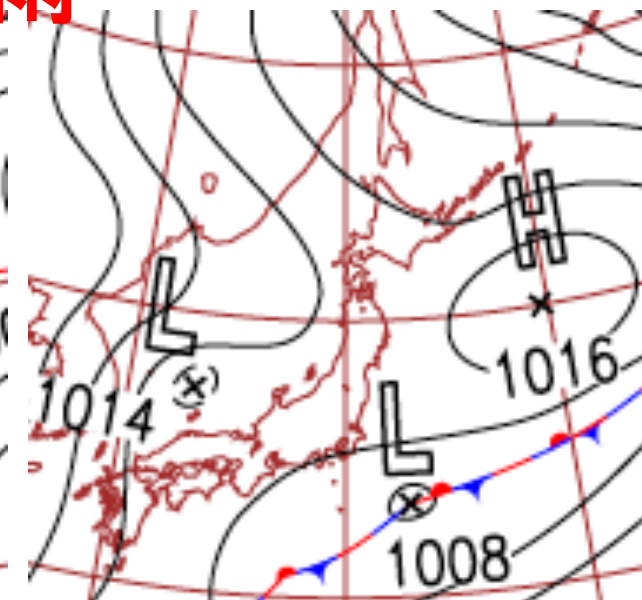
21日に初の本格雨



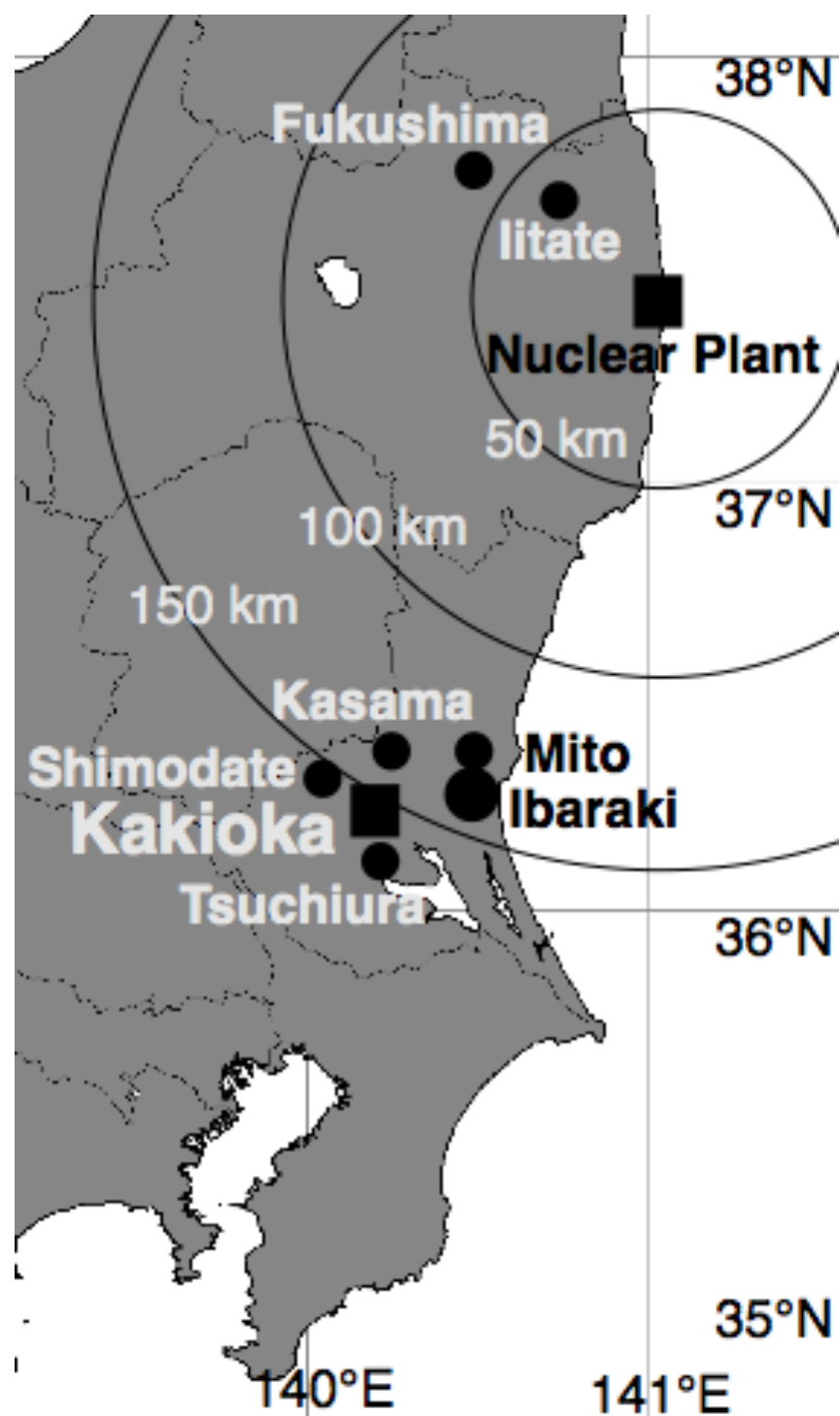
2011-3-20 (00 UT)



2011-3-21 (00 UT)



2011-3-22 (00 UT)



Takeda, Yamauchi, Makino, and Owada (2011): Initial effect of the Fukushima accident on atmospheric electricity, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L15811, doi:10.1029/2011GL048511.

Yamauchi, M., Takeda, M., Makino, M., Owada, T., and Miyagi, I. (2012): Settlement process of radioactive dust to the ground inferred from the atmospheric electric field measurement, *Ann. Geophys.*, 30, 49-56, doi:10.5194/angeo-30-49-2012.

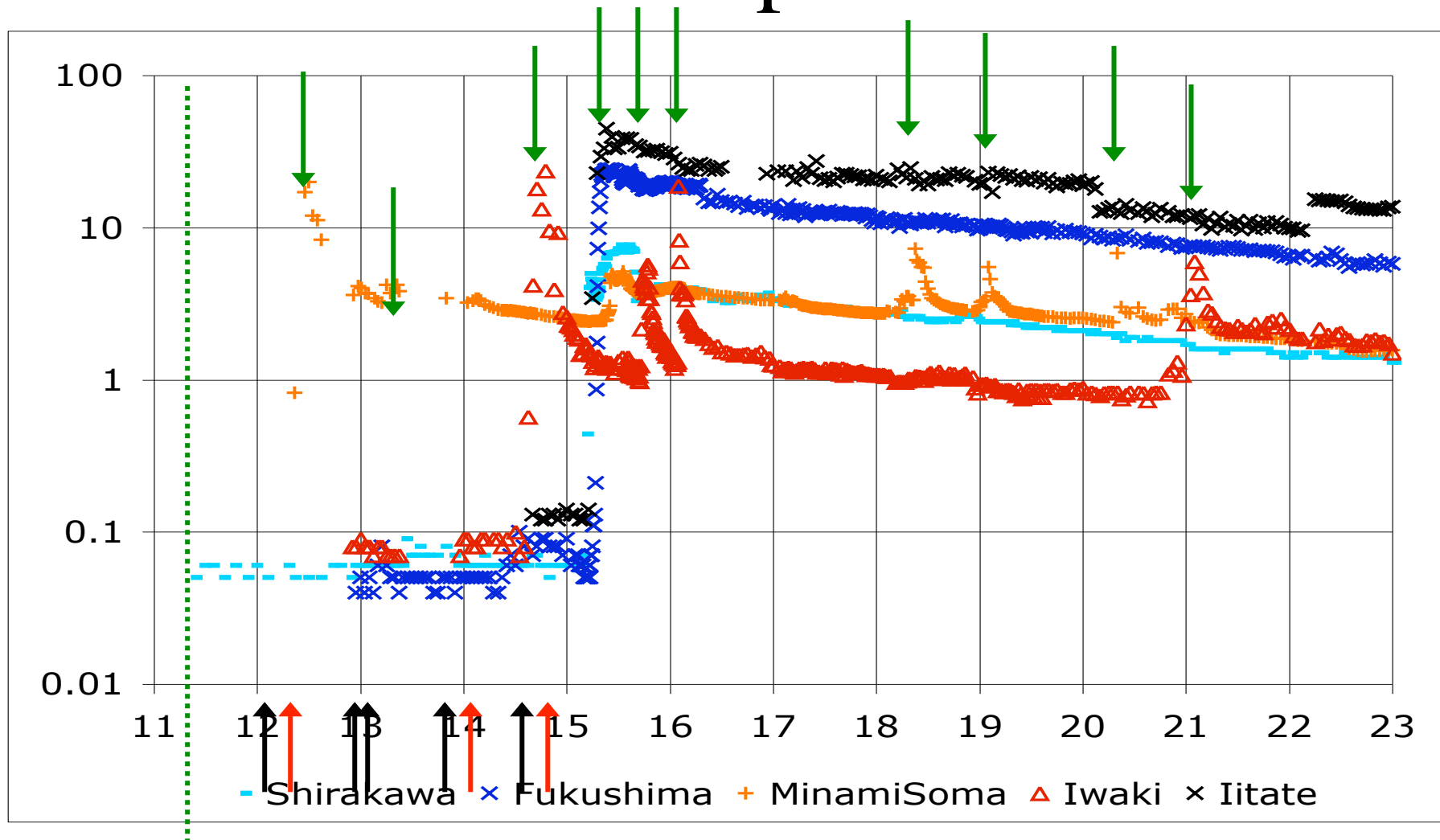
Yamauchi M. Takeda and M, Owada T, (2018) Effect of enhanced ionizing radiation on the cloud electricity after the Fukushima nuclear accident *Earth, Planets and Space* 70:48 <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0780-1>

References

- Harris (1955), Effects of radioactive debris from nuclear explosions on the electrical conductivity of the lower atmosphere, JGR, <https://doi.org/10.1029/JZ060i001p00045>
- Harrison, R.G. and Bennett, A.J. (2007). Multi-station synthesis of early twentieth century surface atmospheric electricity measurements for upper tropospheric properties. *Adv. Geosci.* 13, 17–23.
- Kondo, G. (1959), The Recent Status of Secular Variation of the Atmospheric Electric Elements and their Relation to the Nuclear Explosions, *Memoirs of Kakioka Magnetic Observatory*, 9, 2-6.
- Ogawa, T., Y. Tanaka, A. Huzita and M. Yasuhara (1977), Three-dimensional electric fields and currents in the stratosphere, *Electrical processes in Atmosphere*, DR. Dietrich Steinkopff Verlag, Darmstadt, 552-556.
- Pirce, E.T. (1972), Radioactive fallout and secular effects in atmospheric electricity, JGR, <https://doi.org/10.1029/JC077i003p00482>.
- Tuomi, T. J. (1988), Observations of atmospheric electricity 1986, *Geophys. Publ.* 7, 551.506.1, 61 pp., Finn. Meteorol. Inst., Helsinki.
- Uman, M.A. (1987), *The lightning Discharge*, Academic press, p30
- Yamauchi, M. (2012): Secondary wind transport of radioactive materials after the Fukushima accident, *Earth Planets Space*, 64(1), e1-e4, doi:10.5047/eps.2012.01.002.

Time line: Spread

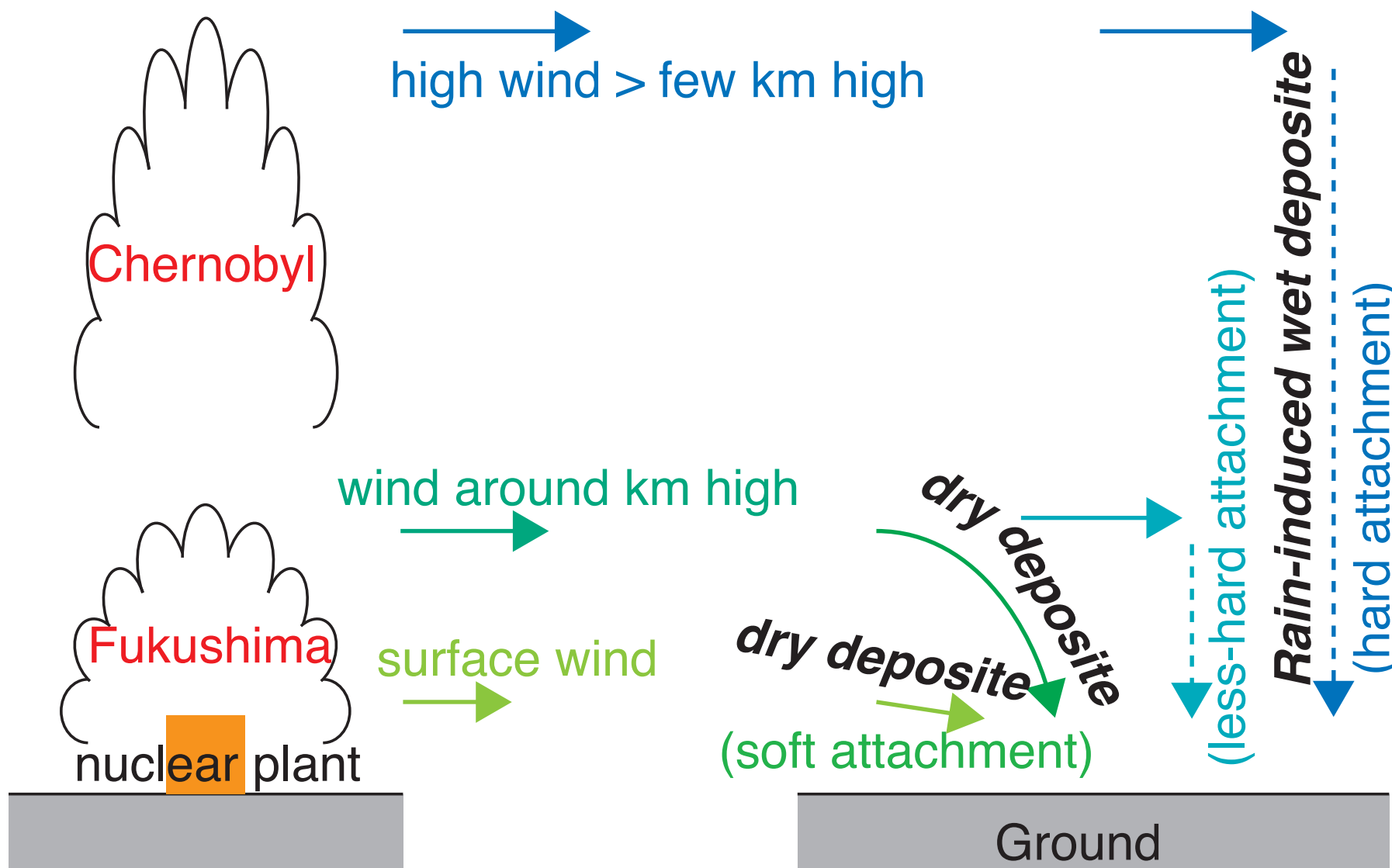
skip



Massive release even after large evens at the nuclear site until 21 March when first heavy rain fall at the nuclear site.

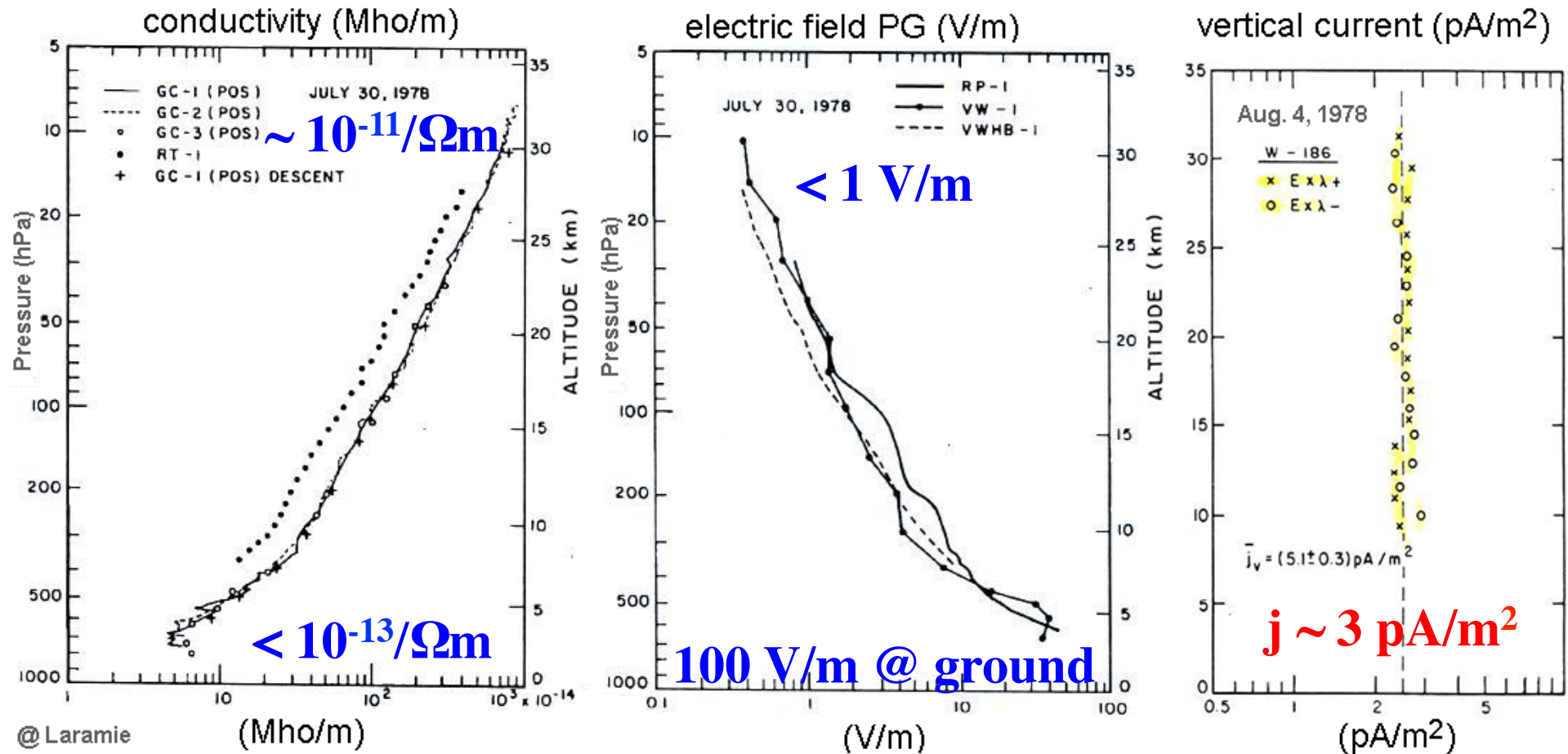
大気経由の放射能汚染：3経路

skip



電場等の高さ分布(気球測定)

skip



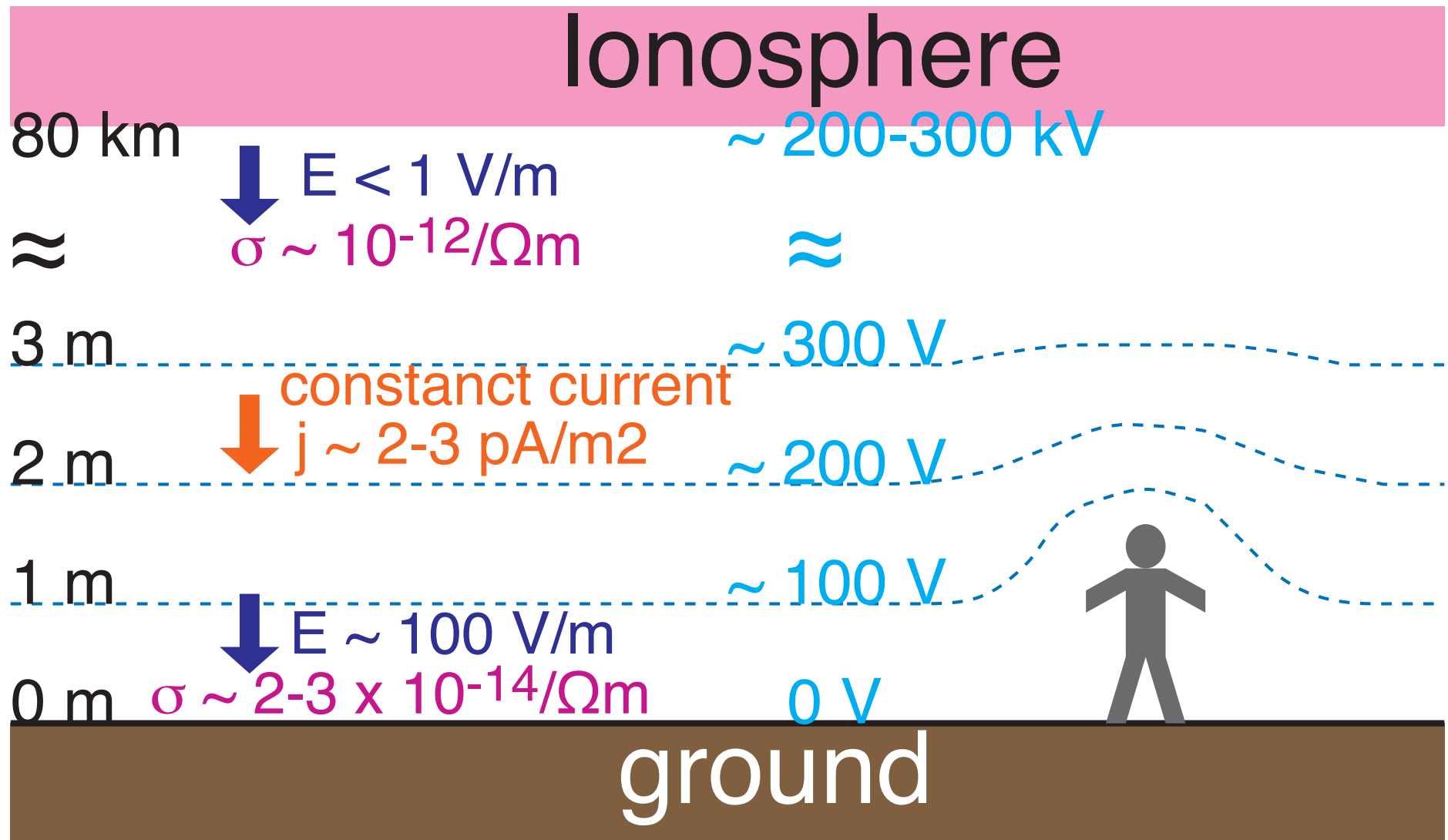
Rosen et al., JGR (1982)

http://www.atmo.arizona.edu/students/courselinks/spring13/atmo589/lecture_notes/feb07/feb07.html

定電流 $\Rightarrow$ 電気伝導度が電場(PG)を決める
地表と上空で2桁以上異なる

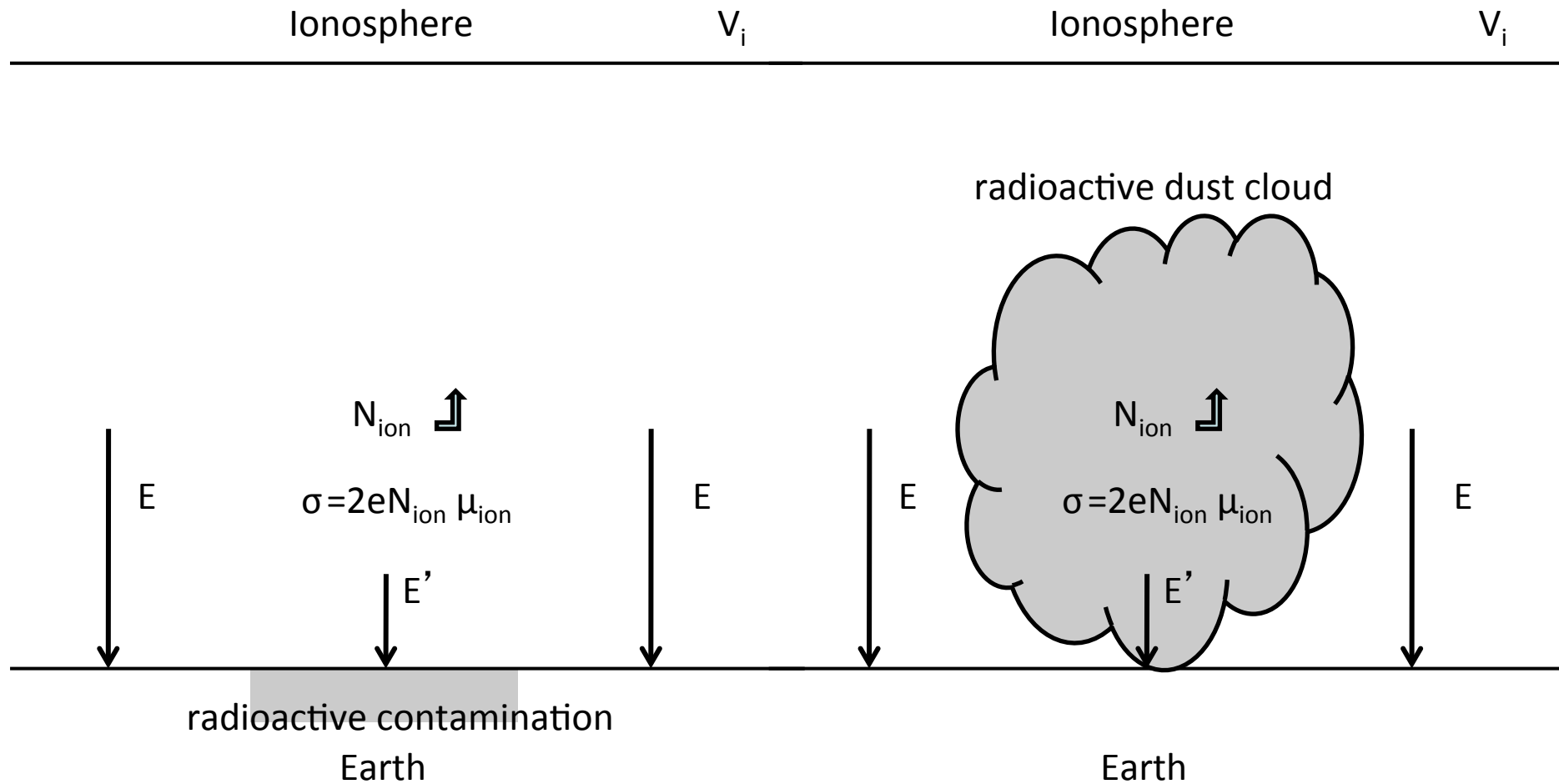
晴天下の地上付近の電場

skip



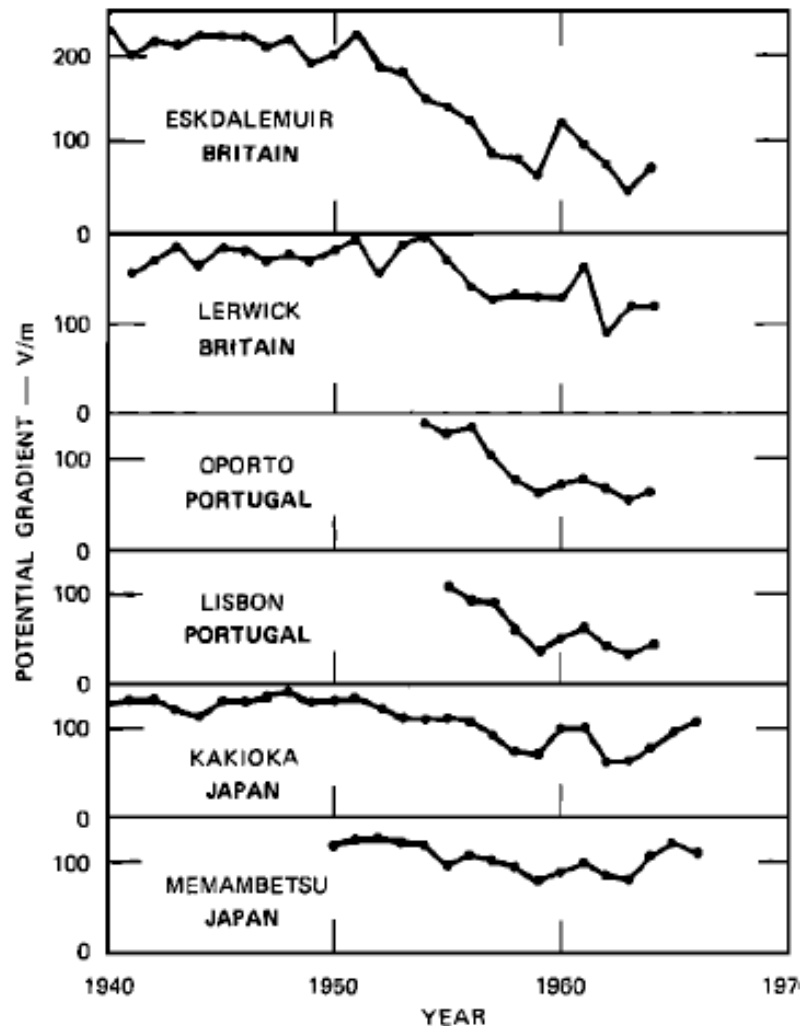
低高度ほど電気伝導度が低くなるので地表電場が上空より高くなる

skip



effect of global fallout of radioactive dust (nuclear test)

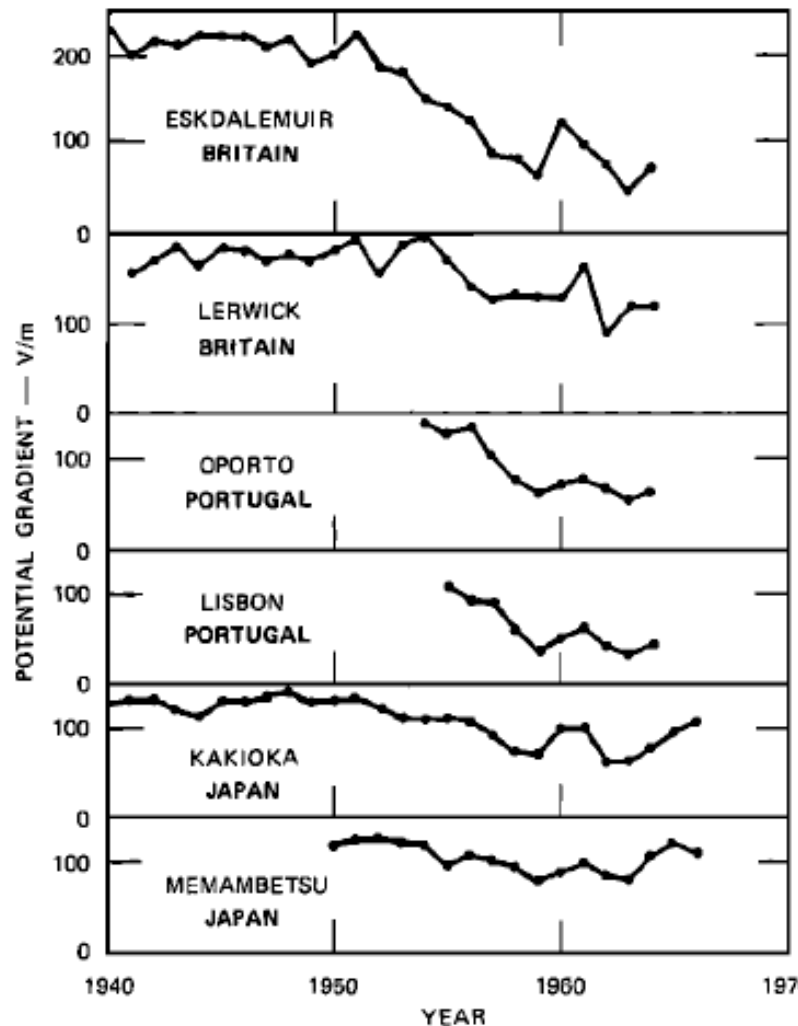
skip



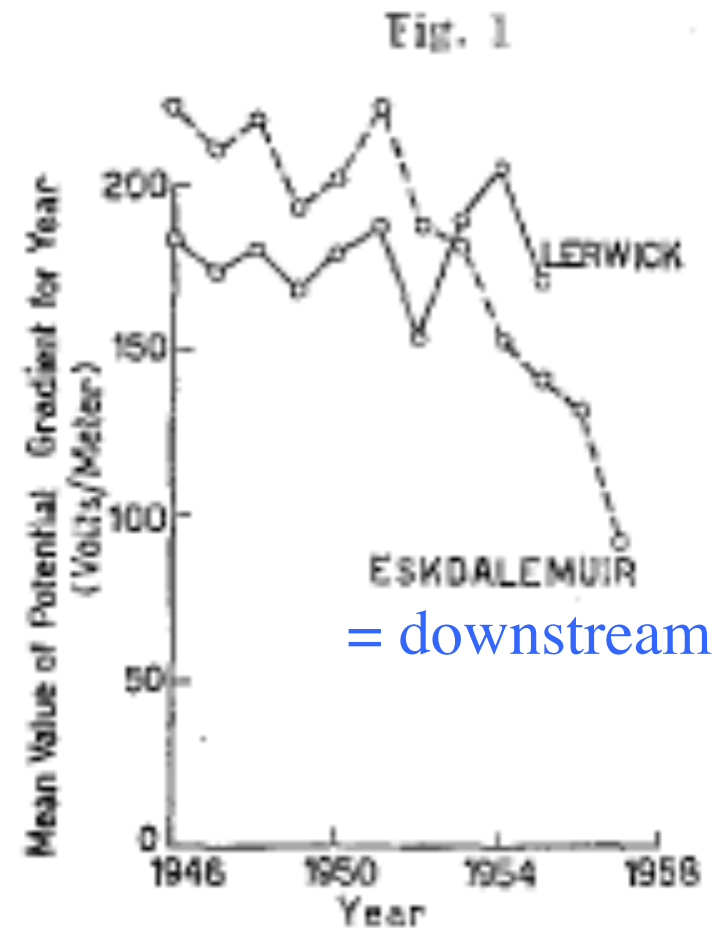
Pierce, 1972 (JGR)

extra dry contamination downstream of Windscale

skip



Pierce, 1972 (JGR)



= downstream

Pierce, 1959 (Pure and Applied Geophysics)

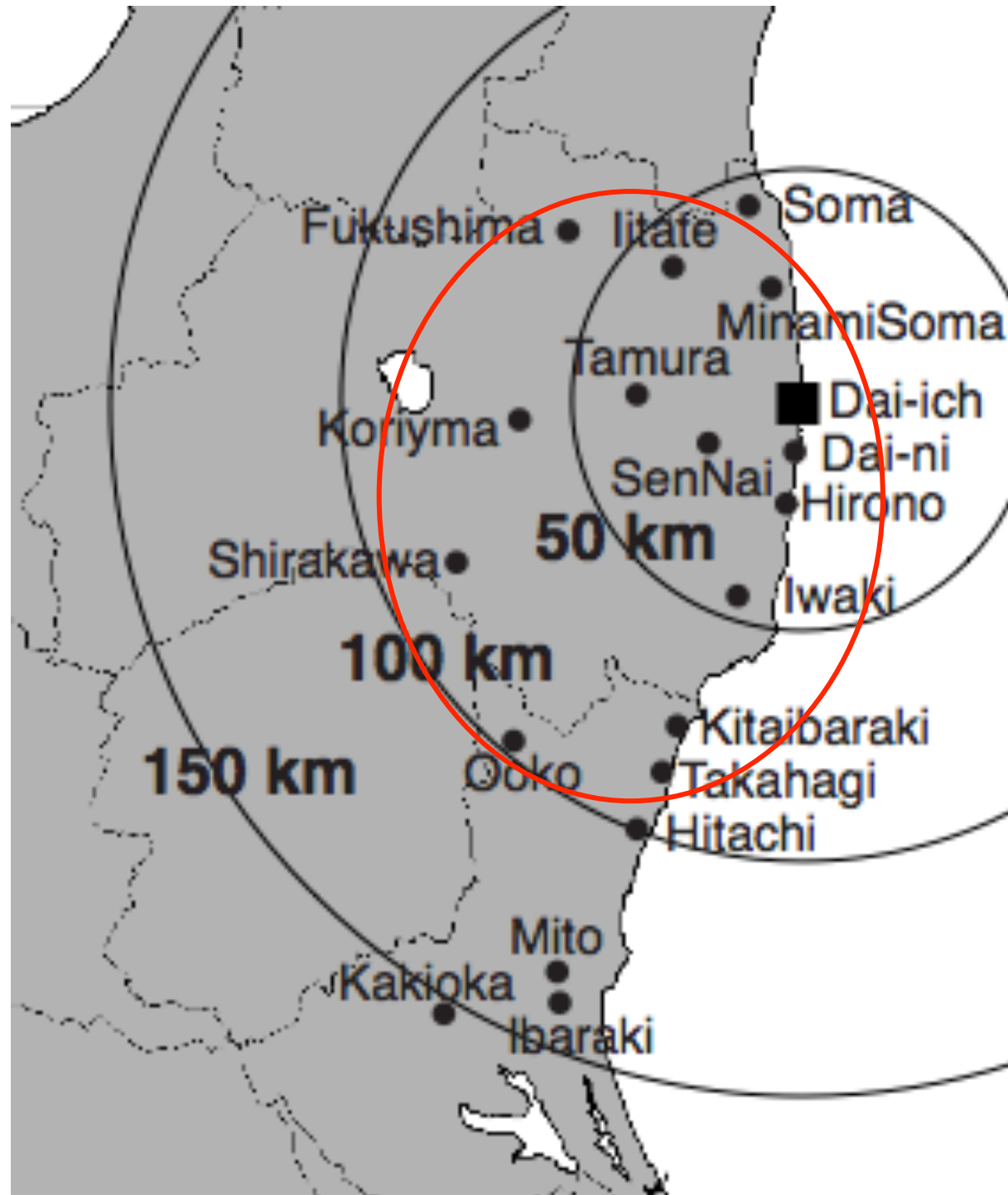
PG measurement at **Kakioka**

Latitude	Longitude
36°13'56"N	140°11'11"E

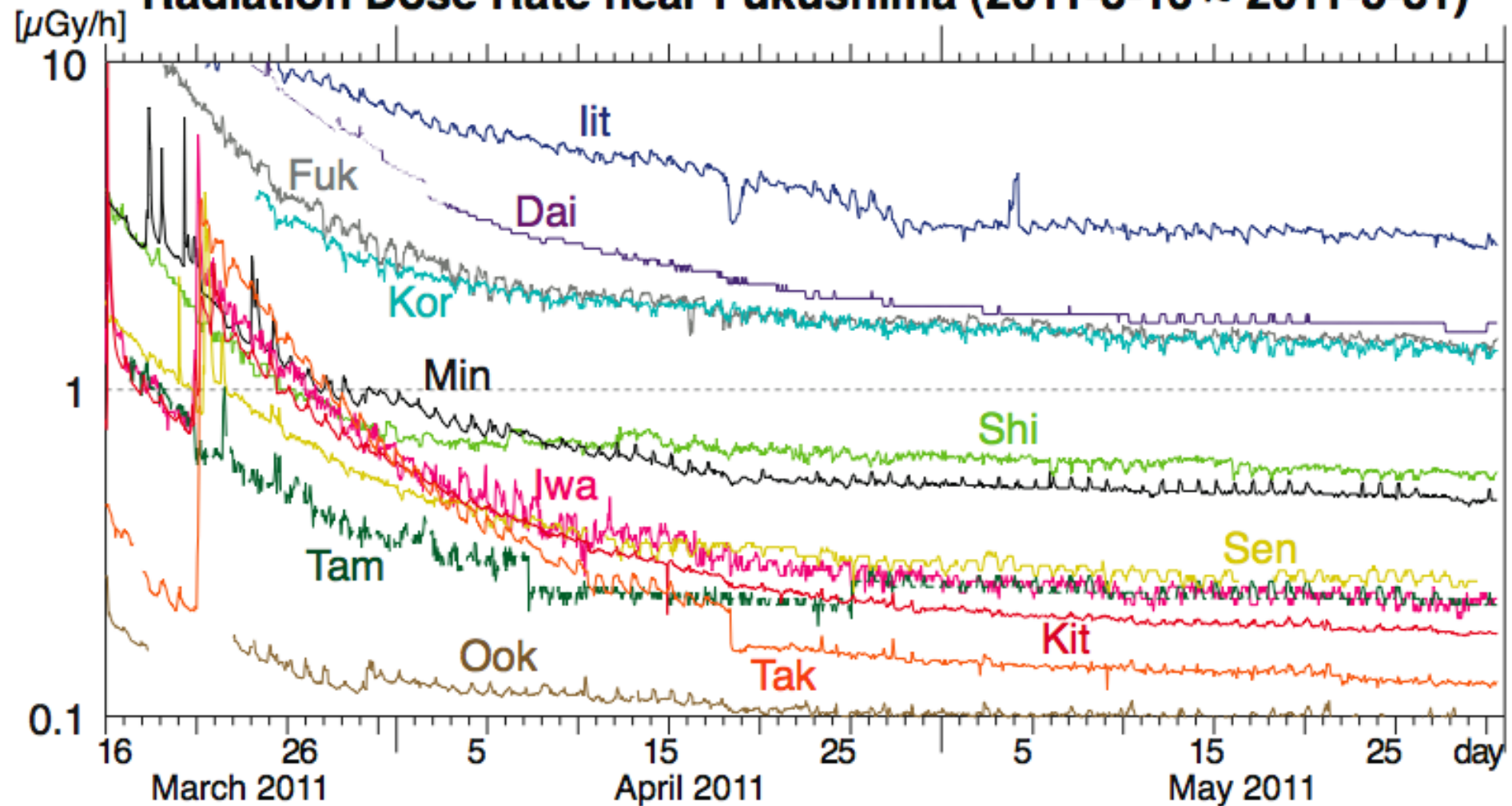


		Main	Sub
Electrometer		Electrostatic sensor type	Field mill type
Collector	Type	Water-dropper	Mechanical
	Height	2.55 m	1.00m
	Separation from the wall	1.17 m	
Sampling		1 sec	1sec

systematic
check



Radiation Dose Rate near Fukushima (2011-3-16 ~ 2011-5-31)



Iwaki (S-43km)

Kitaibaraki (S-70km)

Takahagi (S-80 km)

Ooko (SW-90km)

Daini Nuclear Plant (S-12km)

MinamiSoma (N-24km)

Iitate (NW-39km)

Fukushima (NW-63km)

SenNai (WSW-22km)

Tamura (W-35km)

Koriyama (W-58km)

Shirakawa (WSW-81km)

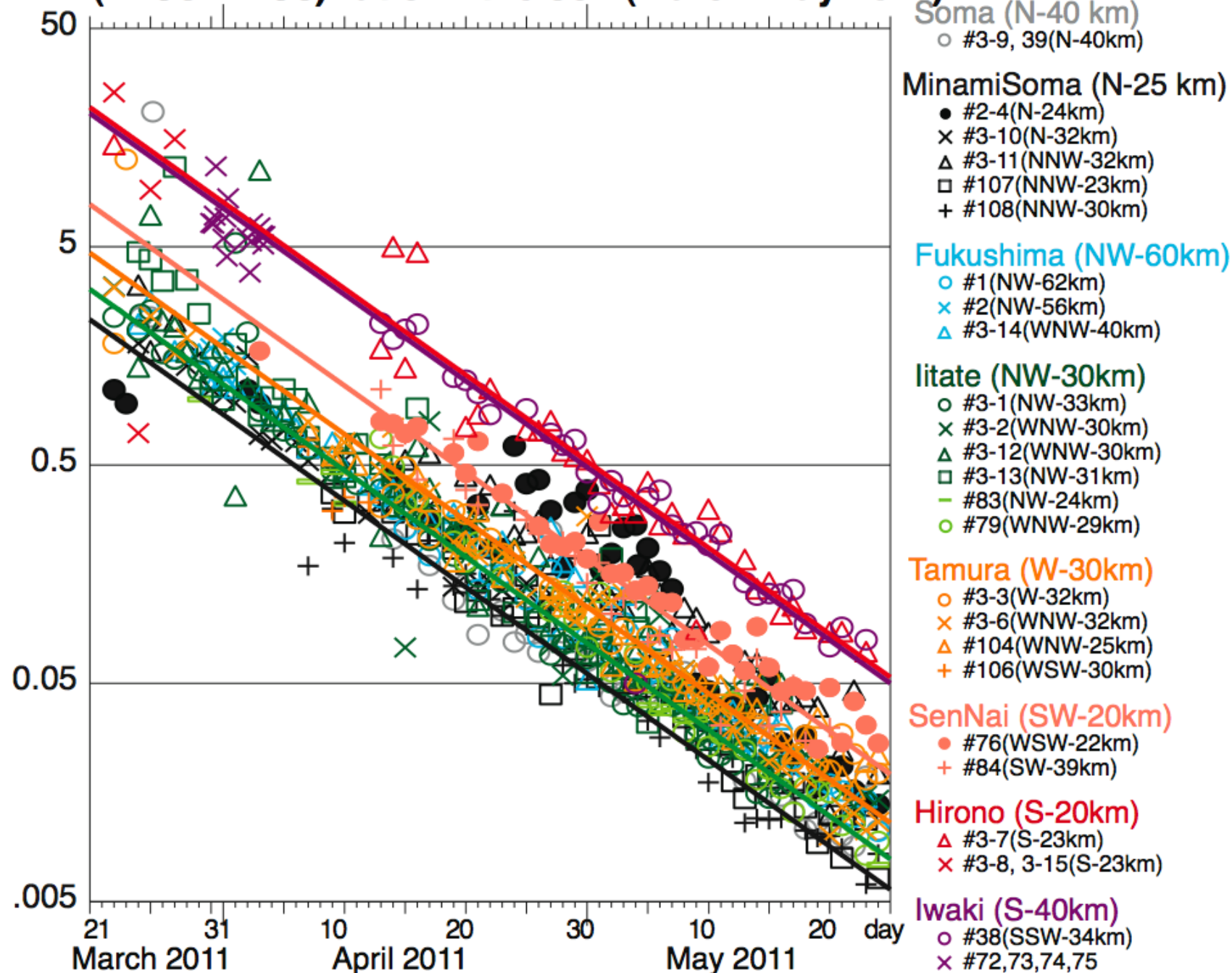
Obvious candidate for different decay

Different I/Cs ratios (different physical decay)
in different regions.

because

half-life is 8 days for I & 2~30 years for Cs

$^{131}\text{I}/(^{134}\text{Cs}+^{137}\text{Cs})$ ratio in the soil (March-May 2011)

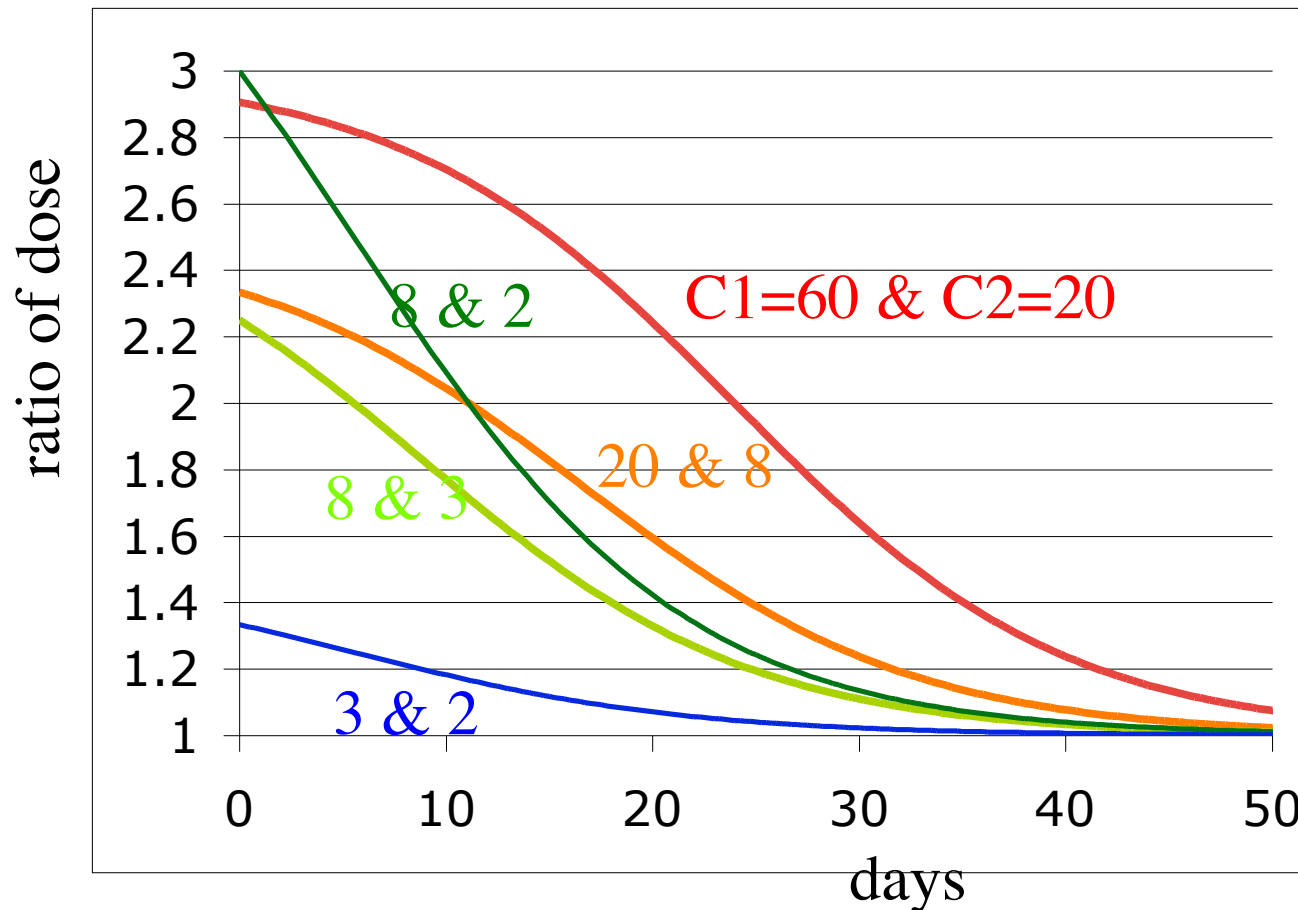


dose rate $\propto C \cdot \exp(-t/T_I) + (-t/T_{Cs})$: $T_I=8$ days, $T_{Cs}>2$ years,

$C=I/C_s$ ratio at $t=0$



ratio of dose $\propto [C_1 + \exp(+t/T)]/[C_2 + \exp(+t/T)]$: $T \approx 8$ days

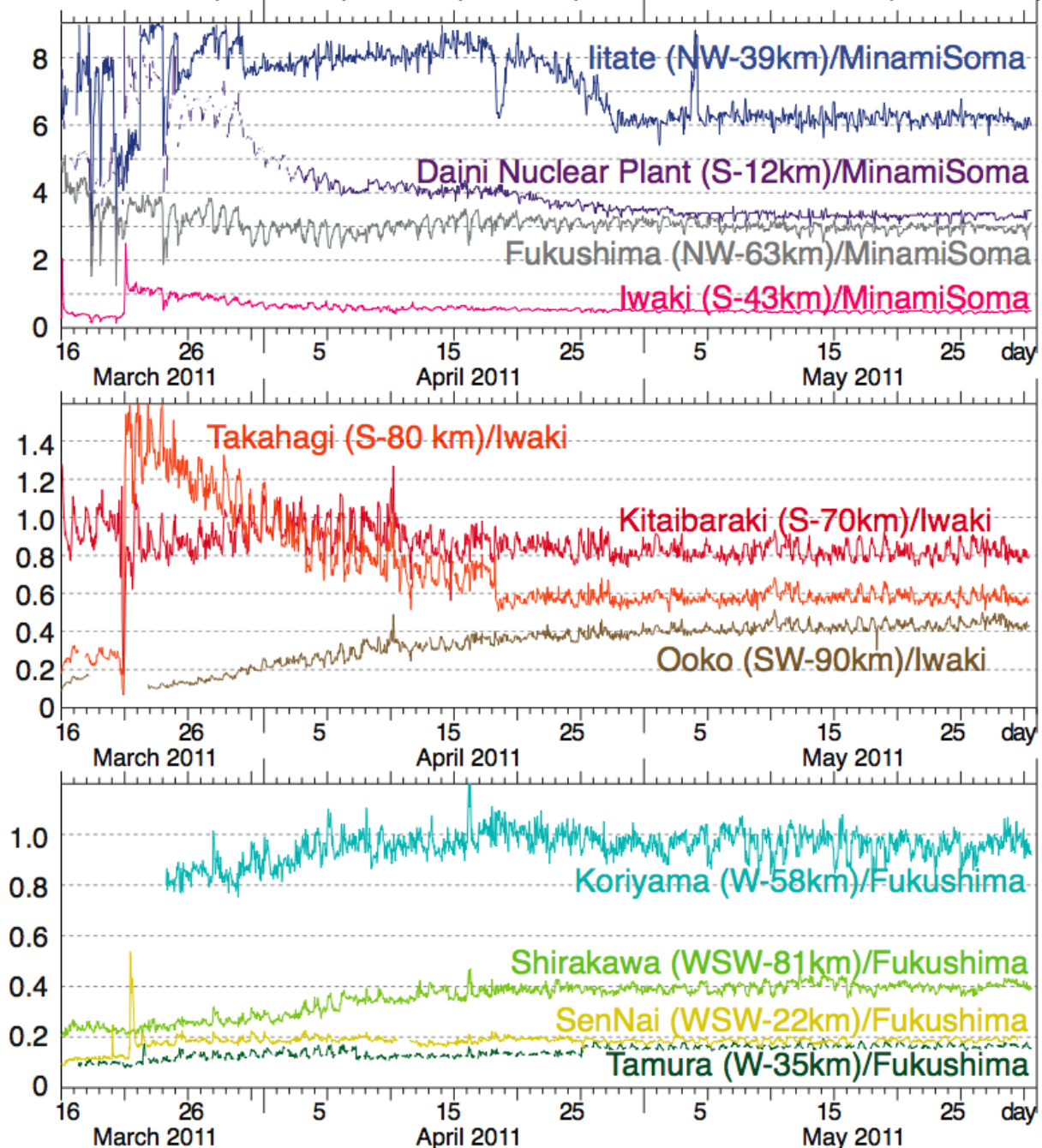


approach
unity,
but with
exceptions

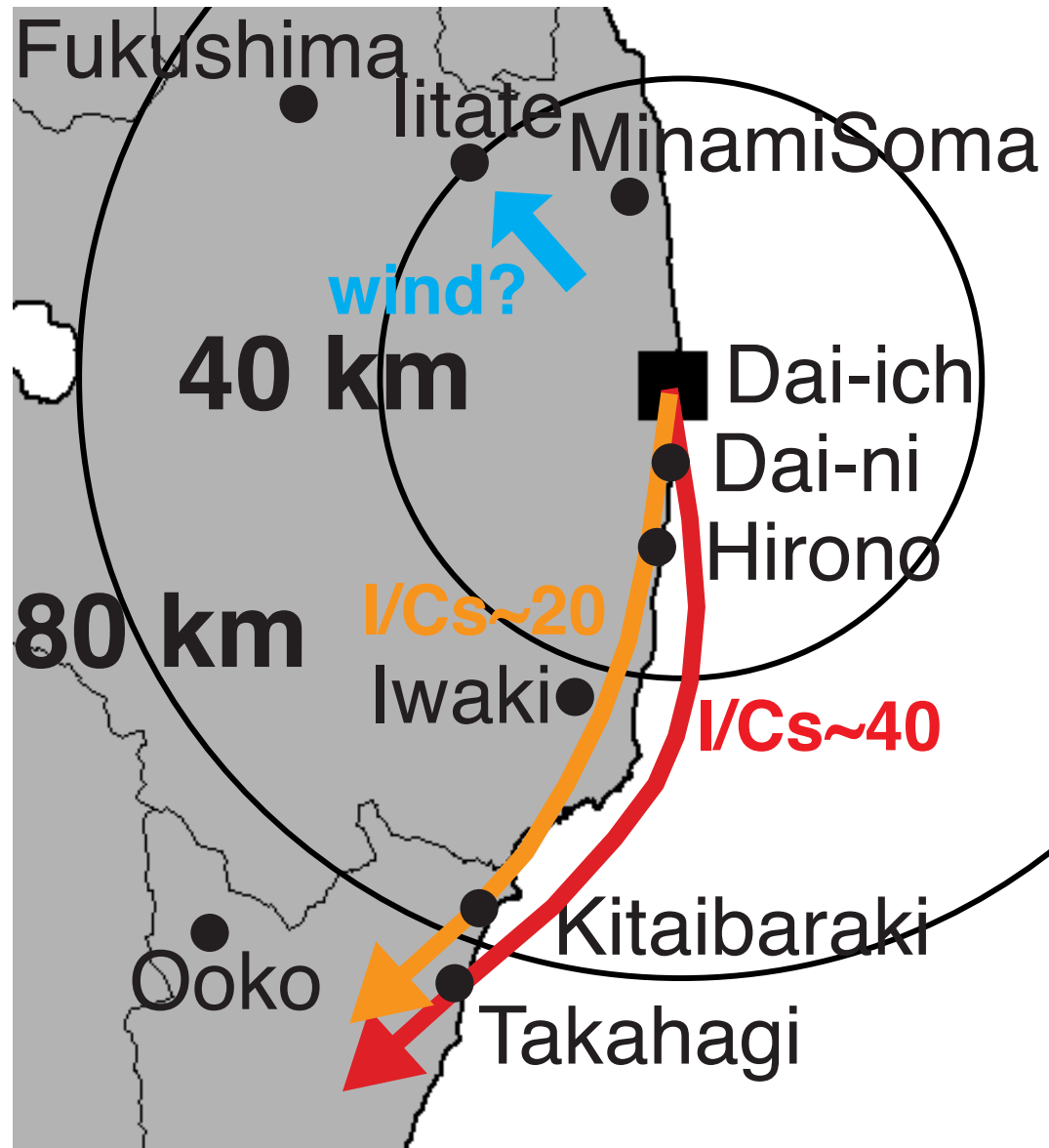
(1) **Takahagi**
= I/Cs ratio

(2) **Iitate**
= slow decay

Relative Radiation Dose Rate (March-May 2011) against MinamiSoma (N-24 km), Iwaki (S-43km), and Fukushima-shi (NW-63km)



Interpretation for Takahagi



Why is Iitate special?

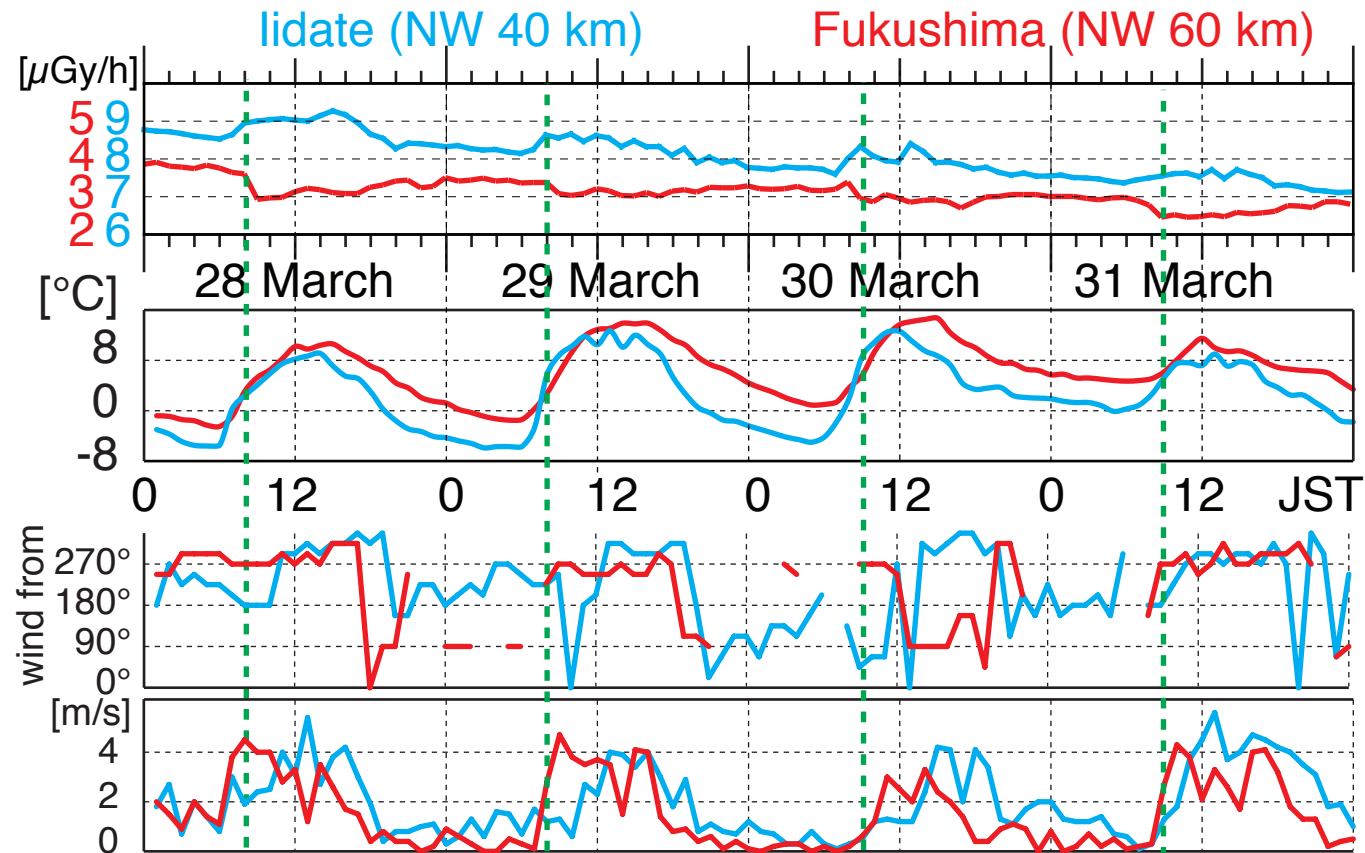
Wind transport (extra inflow)?

If so, what is the transport distance?

Extra weathering loss afterward?

Can wind cause daily variation?

Radiation dose rate at Iitate and Fukushima



Summary-1

Networks of Radiation dose measurement & Atmospheric electric field (PG) measurement help understanding the motion of the radioactive dust.

First time to detect the moment of dry contamination (this is impossible without PG measurement).

Re-suspension and secondary transport are significant until end of April, i.e., 50 days after the accident. This give duration of risk for the internal dose through breathing.

It is not too late to put portable electric field instrument (e.g., field mill) after any nuclear accident because it is useful for more than one month.

Summary-2

- During weak rain or just before/after the rain, PG change toward/from the negative peak is faster during the time that ionizing radiation increased.
- The behavior is consistent with extra shielding of the could charges by the increased ions.
- Back to normal 50 days after the accident (consistent with the end of re-suspension).