

Újdonságok és új lehetőségek a nukleáris medicina képalkotásban

Borbély Katalin

Országos Onkológiai Intézet, PET/CT Ambulancia, Budapest

A hibrid pozitronemissziós tomográfia/komputertomográfia (PET/CT) és a single photon emissziós komputertomográfia/komputertomográfia (SPECT/CT) képalkotás számottevő előnyt hozott úgy a kutatásban, mint a klinikai felhasználásban. A legkorszerűbb hibrid képalkotó modalitás, a szimultán PET/mágneses magrezonancia (PET/MR) technológia egyre szélesebb körben terjed, és olyan új lehetőségeket kínál, amelyről már most tudjuk, hogy tovább fejleszthető és jelenleg is felbecsülhetetlen értékű. A multimodális rendszerek szimultán nyújtják a morfológiai, funkcionális és molekuláris információt az élő szervezetről. Ezeknek a technológiáknak a gyakorlatban történő megfelelő alkalmazása sürgető, mivel az orvostudományi alapkutatás és a klinikai orvoslás bázisául szolgálnak. Magyar Onkológia 58:232–238, 2014

Kulcsszavak: SPECT/CT, PET/CT, PET/MR

Hybrid positron emission tomography/computer tomography (PET/CT) and single photon emission computer tomography/computer tomography (SPECT/CT) have resulted in significant advances both in medical research and routine clinical use. The most recent multimodality system that combines PET and magnetic resonance imaging (MRI) offers new potentials unthinkable before. The hybrid techniques allow obtaining simultaneous morphologic, functional, and molecular information of a living system. The proper use of multimodality imaging is of high importance as they facilitate both basic medical research and clinical practice.

Borbély K. New challenges and perspectives in nuclear medicine imaging. Hungarian Oncology 58:232–238, 2014

Keywords: SPECT/CT, PET/CT, PET/MRI

Levelezési cím: Prof. Dr. Borbély Katalin, Országos Onkológiai Intézet, PET/CT Ambulancia,
1122 Budapest, Ráth Gy. u. 7–9. Tel.: 1-224-8600, fax: 1-224-8720, e-mail: katalin.borbely@oncol.hu

Közlésre érkezett: 2014. október 8. • Elfogadva: 2014. október 22.

BEVEZETÉS

A rák genetikájának és proliferatív természetének megértése az onkológia egyik legfontosabb területe. Az újabb ismeretek eredményeként a diagnosztikában és a terápiában, a klinikai igényeknek megfelelően új eljárásokra kerülhet sor, új radiofarmakonok, biomarkerek felhasználására nyílik lehetőség. Jó példa erre a PET-képalkotás területe, ahol az élő szervezetben molekuláris és sejtszinten karakterizálható és mérhető az aktuális, párhuzamosan zajló biológiai folyamatok, amelyek újabb és újabb ismereteket generálnak a diagnosztikában és a terápiában egyaránt (1–5). A PET-eljárások során a trészerek külön-külön vagy kombinált felhasználásával lehetővé válik az adott patológiával összefüggésben lévő funkcionális elváltozások feltérképezése, kvantifikálható mérése és karakterizálása (1–3. ábra).

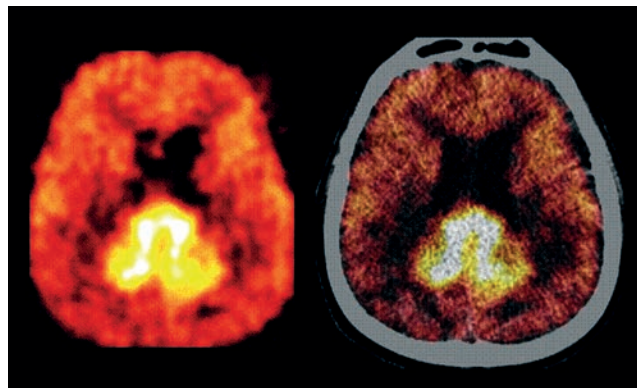
A technika továbbfejlesztésének köszönhetően megjelentek a hibrid PET/CT- és SPECT/CT-kamerák, amelyek a kutatásban és a mindennapi klinikai felhasználásban elért eredményeiket részben a különböző modalitások adatai (funkcionális és morfológiai térképek) egymásba vetítésének köszönhetik. Az új technológiák potenciális lehetőségei jelenleg még közel nincsenek kimerítve, sem a kutatásban, sem a klinikai felhasználásban. Napjaink legmodernebb multimodális technikája a PET/MR, amely szimultán nyújtja az élő szervezet morfológiai, funkcionális és molekuláris jellemzését. A jelenlegi és a jövőben várható hibrid technológiai alkalmazások a tudomány mellett a klinikai felhasználásra fókuszálnak, mivel ígéretes koncepciók az orvosi alaputatástól a mindennapi gyakorlatig. Ezeket a technológiai újdonságokat új vegyületek, biomarkerek, kontrasztanyagok, radiofarmakonok stb. kifejlesztése és felhasználása is követi.

A PET/CT és a SPECT/CT széleskörű elfogadottsága és a megfelelően bizonyított klinikai értéke részben az „önálló” PET- és SPECT-térképekhez viszonyított klinikai előnyöknek köszönhető. A multimodális képalkotásban paradigmaváltás következett be. A funkcionális és az anatómiai adatok fuzionálása, a léziók pontos lokalizálása, a funkciók objektív mérése napjainkban alapvető klinikai igény az onkológia bármely területén.

Rövidítések jegyzéke:

SPECT: single photon (egyfotonos) emissziós komputertomográfia, **CT:** komputertomográfia, **PET:** pozitronemissziós tomográfia, **MR:** mágneses magrezonancia, **MRI:** mágneses magrezonancia vizsgálat, **AC:** attenuation correction (attenuációs/gyengítési korrekció), **CTAC:** CT-alapú AC, **MRAC:** MR-alapú AC, **HD PET:** high-definition PET, **TOF:** time-of-flight, **¹⁸F-FDG:** ¹⁸F-fluorodezoxiglükóz, **SML:** single-molecule level (egymolekula-szintű)

1. ábra. Agyi ¹⁸F-FDG PET és PET/CT transzverzális metszetképek. A radiofarmakont intenzíven, egyenetlenül halmozó (SUV_{max}: 12,8) lézió. Szövetten: glioblastoma multiforme



SPECT/CT

A hibrid SPECT/CT-képalkotás jelentősen javította az 1957-ben Hal Anger által bevezetett „önálló” SPECT-kamerák lehetőségeit (6–8). A fúziós technika elsődleges célja a lézió lokalizálása mellett a PET-adatok (CT) gyengítési korrekciójának (CT-attenuációs korrekció, CTAC) megoldása volt. A SPECT/CT bevezetésével a klinikai információtartalom pontossága és megbízhatósága jelentősen javult. A klinikai protokollok elsősorban staging és restaging kérdésekben tartalmazzák a SPECT/CT alkalmazását, amikor szükséges és fontos a pontos lokalizálás és a sugárterhelés lehetséges minimalizálása.

A nem akaratlagos mozgások, mint a szívösszehúzódás, a légző- és bélmozgások, gyakran jelentenek problémát a SPECT/CT-ben. Ilyenek például a légzőmozgás okozta AC-pontatlanság vagy az emissziós és transzmissziós adatok nem megfelelő egymásba vetítése. Ennek a kiküszöbölésére különböző technikákat és eszközöket alkalmaznak, amelyek az emissziós adatok gyűjtése (képfelvétel) során lehetőséget nyújtanak pl. légzéskapuzásra, segítve a funkcionális és a morfológiai adatok pontos egymásba illesztését.

A kivizsgálások, a különböző invazív terápiák tervezése során egyre inkább figyelmet fordítanak a sugárterhelés csökkentésére, ami a hibrid technikák alkalmazásával ugyancsak javult és tovább javulhat. A jövőben várható a detektorrendszerek térbeli és energetikai felbontásának további javítása és stabilitásának fokozása.

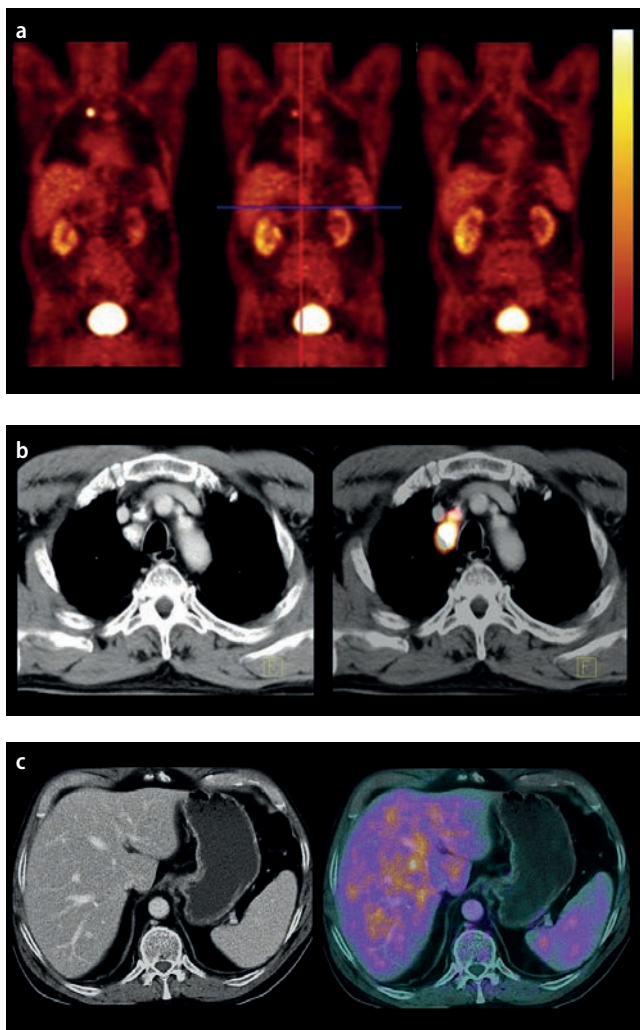
PET/CT

A hibrid PET/CT bevezetése 2001-ben új szakaszt jelentett a hagyományos nukleáris és molekuláris képalkotásban. Javult a PET-vizsgálatok szenzitivitása és specifitása, ami

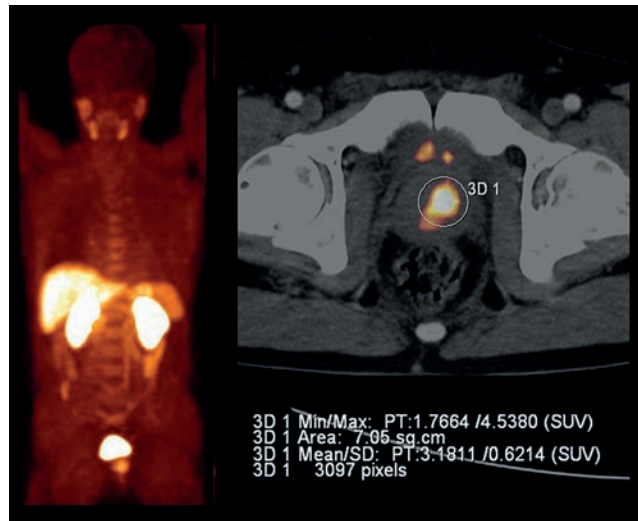
még nagyobb mértékben fokozta a módszer elfogadottságát (9). A hibrid technika nemcsak a vizsgálat időtartamát csökkentette, de paradigmaváltást is eredményezett a klinikai felhasználásban, jelentősen leegyszerűsítve és javítva a betegek klinikai vezetését. Napjainkban a PET/CT a különböző diagnosztikai algoritmusok és kezelési tervek kritikus kulcsszeplője, és gyakran nélkülözhetetlen információtartalommal bír az onkológiai betegek terápiás vezetésében.

Új PET-rekonstrukciós algoritmusok javítják a PET-leképezést, mint pl. a „high-definition PET” (HD PET) (10). Jelentősen javult a gépek térbeli felbontása, szenzitivitása, és a rekonstrukciós algoritmusok gyorsasága. A PET techno-

2. ábra. Medulláris pajzsmirigyrák, restaging. Teljestest ^{18}F -DOPA PET, koronális dinamikus (a) és transzverzális CT és PET/CT metszetképek (b és c). A radiofarmakont intenzíven halmozó ($\text{SUV}_{\text{max.}}$: 6,3) paratrachealis nyirokcsomók és májmetasztázis ($\text{SUV}_{\text{max.}}$: 4,7). Egyéb területekben fiziológias trézereloszlás



3. ábra. Prostatatárak. Teljestest ^{18}F -kolin MIP PET és transzverzális PET/CT metszetképek. A radiofarmakont intenzíven halmozó ($\text{SUV}_{\text{max.}}$: 4,5) régiók. Egyéb területekben fiziológias trézereloszlás



lógiaiában folyamatos előnyt jelentett a detektorok fejlesztése. A módszer hatékonyságát fokozta a time-of-flight (TOF) technika megjelenése, javítva a jel/zaj viszonyt. A „kapuzott” képalkotás nemcsak a diagnózis felállításában, hanem a különböző specifikus terápiás felhasználásokban (műtéti, sugárterápiás tervezés stb.) is fontos adatokkal szolgál.

Jól ismert, hogy a SPECT- és a PET-alapú mérésekben problémát jelent bármilyen „bemozdulás” vagy fiziológiai mozgás. A légzés által okozott műtermékek kiküszöbölésére példa a légzéskapuzással végzett adatgyűjtés, ahol a besugárzástervezést és a -kivitelezést is „kapuzással” végzik, szinkronban a légzési ciklussal (11, 12).

Az aktív betegség heterogenitásának és a határainak a pontos megállapítása fontos klinikai relevanciával bír, pl. a biopsziás beavatkozások vezérlésében, a műtéti és/vagy sugárterápiás tervezésben. A PET-térképek megbízhatóan detektálják a tumorokban a „csúc” (a legnagyobb) metabolikus aktivitást, a daganatszövet legmalignusabb részét, a tumorhatárokat, azok kiterjedését stb., ezért számos daganatlokalizációban (agy, fej-nyak, tüdő stb.) javasolt az alkalmazásuk (13–21). Az onkológiai felhasználásban publikált úttörő jellegű PET irodalmi adatokat az 1. táblázat mutatja be (1, 22).

PET/MR

Az utóbbi években a PET/MR-rendszerek számos típusát mutatták be és kezdték alkalmazni (6, 23, 24). Az integrált PET/MR technológia 3 különböző megközelítést ismerjük:

1. táblázat. PET-vizsgálati eredmények az onkológiai alkalmazások területén, 1978–1992 (1, 22)

Év	Szerző/intézet, ország	Eredmények (állatkísérletes/humán)
1978	Ido et al/BNL, USA	¹⁸ F-FDG: radioszintézis
1980	Som et al/BNL, USA	¹⁸ F-FDG: gyors trésherhalmozás transzplantált leukémiasejtekben (egér)
1982	Fukuda et al/TU, Japán	¹⁸ F-FDG: intrahepatikus tumorok megjelenítése ¹⁸ F-autoradiográfiával (patkány) ¹⁸ F-fluoro-dezoximannóz (¹⁸ F-FDM): daganatlekepezés (patkány)
1982	Di Chiro et al/NIH, USA	¹⁸ F-FDG: glioma-képzés (leképezés és grading) (humán)
1982	Itoh/Hammersmith Hosp., UK (Tohoku Univ., Japán)	¹⁵ O gáz: oxigénextrakciós frakció (oxygen extraction ratio, OER) nem fokozódik az ischaemiás tumorokban (humán)
1983	Yonekura et al/BNL, USA (Kyoto Univ., Japán)	¹⁸ F-FDG: májmetasztázisok PET-leképezése (humán)
1983	Fukuda et al/TU, Japán	¹⁸ F-FDG: májmetasztázisok, hasnyálmirigy-daganat és hepatocellularis carcinoma PET-leképezése (humán) A „DAR” (=SUV) indítványozása
1983	Kubota et al/TU, Japán	¹¹ C-Met: tüdőrák-képzés (humán)
1983	Abe et al/TU, Japán	¹⁸ F-FDG: sugárterápiás válasz (egér, patkány és humán)
1983	Abe et al/TU, Japán	¹⁸ F-jelölt pirimidinanalógok (¹⁸ F-Fd-Urd) (patkány, humán)
1983	Kiyosawa et al/TU, Japán	¹⁸ F-FDG: orbitatumor-képzés (nyúl)
1984	Fujiwara et al/TU, Japán	¹⁸ F-FDG: tüdőrák-képzés (humán)
1985	Yamada et al/TU, Japán	¹⁸ F-FDG: felvételi mintázat az agyban, myocardiumban és a tumorokban (patkány)
1985	Matsuzawa et al/TU, Japán	I. Nemzetközi Onkológiai PET Szimpózium, Sendai, Japán
1985	Paul et al/Turk Univ., Finnország	¹⁸ F-FDG: hepatocellularis carcinoma leképezése (humán)
1985	Ericson et al/ Karolinska Hosp., Svédország	¹¹ C-Met: agydaganatok leképezése (humán)
1986	Fukuda et al/TU, Heidelberg, Németország	¹⁸ F-fluoro-dezoxialaktóz (¹⁸ F-FDG): a máj funkcionális leképezése (patkány)
1987	Strauss et al/Heidelberg, Németország	II. Nemzetközi Onkológiai PET Szimpózium, Heidelberg, Németország
1987	Paul et al/Turk Univ., Finnország	¹⁸ F-FDG: malignus lymphomák leképezése (humán)
1987	Fukuda et al/TU, Japán	¹⁸ F-FDG: hepatocellularis carcinoma leképezése (humán, patkány)
1988	Abe et al/TU, Heidelberg, Németország	¹¹ C-Met: regionális ¹¹ C-Met-eloszlás a tumorszövetben (egér)
1989	Strauss et al/Heidelberg, Németország	¹⁸ F-FDG: recidív colorectalis carcinomák PET-értékelése (humán)
1989	Kubota et al/TU, Japán	¹¹ C-Met: sugárterápiás válasz (egér)
1989	Kubota et al/TU, Japán	¹⁸ F-FDG: mellrák leképezése (humán)
1990	Kubota et al/TU, Japán	¹⁸ F-FDG, ¹¹ C-Met: a PET diagnosztikai pontossága a tüdő kerekárnyékai differenciáldiagnózisában (humán)
1991	Okada et al/Chiba Univ., Japán	¹⁸ F-FDG: malignus lymphomák leképezése, a tréserfelvétel és a betegségkimenetel korrelációja (humán)
1991	Wahl et al/Michigan, USA	¹⁸ F-FDG: mellrák ¹⁸ F-FDG-leképezése (humán)
1991	Kubota et al/TU, Japán	Öt tréser (¹⁸ F-FDG, ¹¹ C-Met, ³ H-Timidin, ¹⁸ F-Fd-Urd, ⁶⁷ Ga): megvalósíthatósági tanulmány a daganatok sugárterápiájában (patkány)
1991	Ishiwata/TU, Japán	¹⁸ F-fluoro-parabór-fenilalanin: szintézis, PET-leképezés a daganatok bőr-neutron terápiajában (boron neutron capture therapy, BNCT)
1992	Borbély et al/NIH, USA, Magyarország	¹⁸ F-FDG: neuromák (schwannomák) metabolikus aktivitásának/malignitásának vizsgálata (humán)
1992	Okada et al/Chiba Univ., Japán	¹⁸ F-FDG-felvétel és a Ki-67-index korrelációja
1992	Kubota et al/TU, Japán	¹⁸ F-FDG: nagy ¹⁸ F-FDG-felvétel a makrofágokban és a granulációs szövetekben (egér) ¹¹ C-Met és ¹⁸ F-FDG: halmozási tulajdonságok összehasonlítása daganatszövetben (egér)
1992	Klever et al/TUA, Németország	¹⁸ F-FDG: hasnyálmirigy-daganatok PET-leképezése (humán)
1992	Koh et al/Univ. Washington, USA	¹⁸ F-fluoro-mizanidazol (¹⁸ F-MISO): hypoxiás szövetek leképezése tumorokban (humán)
1992	Ito et al/Nagoya Univ., Japán	¹⁸ F-FDG: recidív rectumtumorok és a hegszövet elkülönítése, összehasonlítva az MR-rel (humán)
1992	Okazumi et al/Chiba Univ., Japán	¹⁸ F-FDG: hepatocellularis carcinomák, korreláció a ¹⁸ F-FDG-halmozás mértéke és a differenciáció foka között, 2-kompartmentanalízis (humán)

BNL: Brookhaven National Laboratory, TU: Tohoku University, Heidelberg: Heidelberg Cancer Center, TUA: Technical University of Aachen, NIH: National Institutes of Health

1) hármas modalitás, 3T MR és TOF PET/CT, egymás melletti helyiségekben; 2) egymás utáni, „tandem” (vonatszerű) megoldás, 3T MR, TOF PET/CT és a betegmozgatást végző rendszer; 3) teljes mértékben integrált rendszer: a PET a 3T MR-készülékbe építve.

A PET/MR-képalkotásban kezdetben problémát jelentett, hogy nem nyújtott megfelelő információt az emisziós adatok gyengítési korrekciójához, ami alapvető igény a PET-leképezésben és -mérésben. A megbízható MR-alapú AC (MRAC) kulcsfontosságú a PET-adatok megfelelő feldolgozásában (25, 26).

A PET/MR-rendszerekben kiemelt figyelmet fordítottak a PET-detektorok és a mágneses tér kölcsönhatásaiból származó problémák (műtermékek megjelenése, képminőség romlása) megoldásának (22, 27). A szimultán PET/MR technológiában (Siemens) alkalmazott MR-alapú AC áttörést hozott. A rendszer egyre szélesebb körű elfogadottsága nemcsak a tudományban, de a klinikai felhasználásban is jelentős, miután 2011 júniusában zöld utat kapott a humán felhasználásban.

Minek nevezzük a kombinált PET/MR-képalkotást? A lényeg minden esetben ugyanazt jelenti. A névválasztást általában az határozza meg, hogy az adott személy (csapat) háttere a PET vagy az MR világából származik, a nukleáris medicina vagy a diagnosztikus radiológia áll szakmailag vagy más szempontból közelebb hozzá. Az idő eldönti ezt a gyakorlatot.

A rendszerépítők többnyire az osztásjelet (/) javasolják a „PET/MR” megnevezésben alkalmazni, amennyiben a rendszerek egybeépítése hardveres alapú, és amikor nem az, hanem a modalitások egymás után vagy egymás mellett helyezkednek el (más a fuzionálási megoldás), akkor azt kötőjellel (–) javasolják jelölni.

A PET/CT-képalkotással ellentétben a PET/MR történelme a preklinikai alkalmazásokkal kezdődött, és jelen volt, mielőtt klinikai felhasználásra javasolták volna (28). A PET/MR-rendszereket igen jelentős ipari támogatással hozták létre, amikor semmilyen klinikai felhasználását nem határozták meg, és ez ma sem történt meg egyetlen klinikai indikációban sem. Ez meglepő, tekintettel arra, hogy az integrált hardveres rendszerek előállítására igen költséges, és az egészségügyi költséghatékonysági vizsgálatok, a bekerülési költségek tisztázása alapos, kiterjedt elemzés alatt áll (29). Mindezek ellenére meglehetősen sok intézet és egészségügyi központ investál ebbe a képalkotási kombinációba, reménykedve a PET/MR ígéretes felhasználási lehetőségeinek mielőbbi meghatározásában.

A kereskedelmi forgalomba került Philips PET/MR-rendszer gyártói perspektíváit Kalemis és mtsai részletesen elemezték (30). A három modalitású PET/CT-MR (GE)

rendszer Veit-Haibach és mtsai mutatták be (31). A szimultán PET/MR (Siemens) rendszerről Kjær és mtsai számoltak be, ahol a PET-detektorokat a 3T MR-gépbe beépítették (32). A rendszerek klinikai jelentőségét számos munkacsoport tanulmányozta és tanulmányozza (33–36). Egymás mellett elhelyezkedő, nagy felbontású agyi PET-kamerát és 7T MR-készüléket alkalmazó PET-MR rendszerről Cho és mtsai írtak (37). A készülék egyedülálló, nincs kereskedelmi forgalomban, és jó példája annak, hogy a technológiai alapokat figyelembe véve milyen irányba mehetnek el a jövőben a PET/MR-készülékek. Számos munkacsoport foglalkozik és ír a PET-képek feldolgozásában az aranystandardot jelentő CTAC fontosságáról és az MR-alapú AC lehetőségeiről (38). A PET/MR üzembe helyezéséről és működtetéséről telepítési és szervezési kérdésekről kiváló szakmai összefoglalók jelentek meg.

A PET/MR-munkafolyamatok során, amikor a két technikát együttesen alkalmazzák, az azzal járó biztonsági kérdések (ionizáló sugárzás, mágneses tér stb.) nem várt mértékben fokozódnak. Mindezekkel a kérdésekkel, beleértve a képalkotási folyamatok bármely lehetséges kihívásait, javasolt alaposan foglalkozni. Az ezzel járó szigorú munkamorál és a különböző munkafolyamatok optimális megteremtése és betartása nélkülözhetetlen feltétele az eredményes működésnek.

Az ugyancsak kulcsszerepet játszó ¹⁸F-fluoro-dezoxiglükóz (¹⁸F-FDG) és nem ¹⁸F-FDG PET-trészek felhasználásával a funkcionális és molekuláris PET/MR-képalkotásban is számos munkacsoport foglalkozik, és a különböző specifikus radiofarmakonokat itt is fontosnak tartják.

Sugárterhelés. A PET/MR vitathatatlan és megkérdőjelezhetetlen előnyét a gyermekgyógyászatban nem lehet elégszer hangsúlyozni. A PET/MR-alkalmazásokban a sugárterhelés szignifikánsan csökken, összehasonlítva a PET/CT-vel. Ez fontos a betegkövetésben, a gyakori kontrollvizsgálatoknál és minden olyan esetben, ahol a sugárterhelés minimalizálása szükséges.

A PET/MR hátrányai. A PET/MR specifikus hiányosságokkal is bír a PET/CT-vel szemben az onkológiai alkalmazásokban. Az MR nem helyettesítheti a CT-t a kis kiterjedésű pulmonális nodulusok megfelelő detektálásában, ami a tüdőrákban alkalmazott képalkotás vitális része. A CT szerepe ugyancsak kiemelendő a csontrendszer struktúrájának és mineralizációjának a vizsgálatában, az oszteolitikus csontmetasztázisok detektálásában. Ezenkívül nem felelkezhetünk meg azokról a betegekről, akik nem vizsgálhatók MR-rel (klausztrófia, kardiális pacemaker, implantált defibrillátor vagy más fémimplantátumok stb.).

A gazdasági szempontok számottevő tényezővel bírnak a PET/MR-vizsgálatok kapcsán is. A vizsgálatok költsége lényegesen meghaladja a PET/CT-mérésekét. A PET/MR

hosszabb időtartamú és komplexebb vizsgálat a PET/CT-hez viszonyítva, és az egy nap alatt elvégezhető vizsgálatok száma alacsonyabb.

MEGBESZÉLÉS

A képalkotási modalitások kombinálása természetesen eredményezi az adott gépek előnyeinek és hátrányainak a megjelenését, az erősségeik előnybe helyezését, kompenzálva a gyengeségeiket. A PET/CT megjelenése előtt a funkcionális és a morfológiai adatok leképezése külön-külön vizsgálat alkalmával történt, viszont a mérések későbbi fuzionálása sem oldotta meg az egy időben, egyazon pozícióban történő feltérképezést. A különböző vizsgálatok órák, többnyire napok távlatában készültek, különböző fiziológiai állapotokban. Az anatómiai lokalizálás szignifikánsan változott a légzési és/vagy bélmozgások miatt, ezért az adott régió funkcionális, metabolikus térképei nem illeszked(het)tek megfelelően az anatómiai adatokba. A megoldást a gépi modalitások egy rendszerbe történő építése jelentette. Az onkológiai megbetegedések szempontjából ezek a modalitások a lehető legérzékenyebb és legspecifikusabb diagnosztikai megoldások.

A hibrid rendszerek töbttényezős diagnosztikai adatokkal szolgálnak a betegről, az adott megbetegedésről. Bár a PET viszonylag alacsony felbontással rendelkezik, egyedülálló képességekkel bír az anyagcsere-feltérképezésben sejtszinten, és a funkcionáló élő szervezetben a metabolitok koncentrációjának pikomoláris szintű értékelését nyújtja.

Az élettani és a patológiai funkciók (metabolizmus, receptoraktivitás, génexpresszió stb.) pontos feltérképezésében a PET, a CT és az MR technikák ideális partnerséget alkotnak a kombinált felhasználásban. A PET/CT-, SPECT/CT- és PET/MR-vizsgálatokban a különböző funkcionális és morfológiai adatok lehető legpontosabb egymásba vetítése történik. Mindezek felbecsülhetetlen klinikai értékkel bírnak, és a különböző technikai, radiokémiai, számítógépes stb. fejlesztések szempontjából is nagy jelentőségűek.

JÖVŐKÉP

A közeljövőben várható a ^{18}F -FDG PET/CT-vizsgálatok indikációs körének további bővítése. Az új, nem ^{18}F -FDG radiofarmakonok befogadása mellett hangsúlyozott szerephez jut(hat) a PET/MR, elsősorban a gyermekgyógyaszatban és minden olyan klinikai területen, ahol a sugárterhelés minimalizálása azt szükségessé teszi. A különböző PET-térképek és az MR-szekvenciák együttes alkalmazása javíthatja a betegek diagnosztikáját, és a betegségspecifikus, töbttényezős, szofisztikált megközelítés korai, költséghatékony terápiát eredményezhet.

Az eddigi kutatási és klinikai tapasztalatok alapján a PET/MR számos klinikai területen hasznos és felbecsülhetetlen értékű. A technológia egyik leghangsúlyozottabb klinikai értéke, hogy a PET/MR-vizsgálatokban szignifikánsan alacsonyabb a sugárterhelés, szemben a PET/CT- vagy a SPECT/CT-alkalmazásokkal. Ez hangsúlyozott kérdés minden betegcsoportban, de a gyermekek, a fiatal felnőtt és a terhes nőbetegek szempontjából kiemelkedő jelentőséggel bír. A hibrid csúcstechnológia nagy valószínűséggel ott lehet még preferált, ahol az MR előnyt élvez a CT-leképezéssel szemben. A sugárterheléssel kapcsolatos információk mellett fontos indikációk lehetnek az elváltozások szervspecifikus megjelenítése, a molekulakonzentrációk spektroszkópiás mérése stb.

Várható a jövőben optikai/PET és optikai/SPECT képalkotó rendszerek megjelenése is, ami szintén közelebb vihet a korai diagnosztikához és a hatékony orvosláshoz (39). Az optikai képalkotás lehetővé teszi a szubmikrometrikus térbeli és időbeli felbontást ezredmásodperces gyakorisággal, egymolekula-szintű (single-molecule level, SML) szenzitivitással. A nukleáris medicina és az optikai képalkotás kombinálása transzlációs alapot jelenthet a kisállatmodellekben alkalmazott biolumineszcens és fluoreszcens technikák és a humán nukleáris medicina (radiofarmakon) alkalmazások között. Ugyanez a gondolatmenet alkalmazható az optikai képalkotás és az MR kombinálásában, ami lehetővé teszi bármilyen kis optikai jellel bíró elváltozás detektálását nagy felbontású 3D strukturális leképezésben. Ez fontos alkalmazási terület lehet a minimálisan invazív műtétek esetében.

Specifikus leképezési biomarkerek kifejlesztése várható, ami a betegvezetés jobb stratégiáját teszi lehetővé és segíti a személyre szabott terápiák megválasztását. Ezekkel az „intelligens” eszközökkel specifikus biológiai jelenségek kimutatása is megcélozható, amelyek korai diagnózist és megfelelő hatással bíró terápiás tervezést és terápiás hatásmérést eredményezhetnek. A következő generációkban várható, hogy a molekuláris képalkotás a multimodális rendszerek alkalmazásával egyre nagyobb szerepet vállal a mindennapi orvosi gyakorlatban.

IRODALOM

1. Borbély K, Fulham MJ, Brooks RA, et al. PET-fluorodeoxyglucose of cranial and spinal neuromas. *J Nucl Med* 33:1931–1934, 1992
2. Borbély K. PET-FDG vizsgálatok szerepe a gliómás betegek klinikai vezetésében. *Magyar Radiológia* 68:188–192, 1994
3. Borbély K. A pozitronemissziós tomográfia helye a korszerű betegvezetésben. *Orvosi Hetilap* 140:171–178, 1999
4. Borbély K, Nyáry I, Tóth M, et al. Optimization of semi-quantification in metabolic PET studies with (^{18}F) -fluorodeoxyglucose and (^{11}C) -methionine in the determination of malignancy of gliomas. *J Neurol Sci* 246:85–94, 2006

5. Borbély K. PET-CT a pulmonológiában. Képpalkotó eljárások. In: Tüdőrák a gyakorlatban és a mellhártya mezoteliómája Szerk. Kovács G, Ostoros Gy, Szondy K. Medicina, Budapest 2006, pp. 98–101
6. Patton JA, Townsend DW, Hutton BF. Hybrid imaging technology: from dreams and vision to clinical devices. *Semin Nucl Med* 39:247–263, 2009
7. Anger HO. Scintillation camera. *Rev Sci Instrum* 29:27–33, 1957
8. Despres P, Funk T, Shah KS, et al. Monte Carlo simulations of compact gamma cameras based on avalanche photodiodes. *Phys Med Biol* 52:3057–3074, 2007
9. Beyer T, Townsend DW, Brun T, et al. A combined PET/CT scanner for clinical oncology. *J Nucl Med* 41:1369–1379, 2000
10. Panin VY, Kehren F, Michael C, et al. Fully 3-D PET reconstruction with system matrix derived from point source measurements. *IEEE Trans Med Imaging* 25:907–921, 2006
11. Bundschuh R, Martínez-Möller A, Essler M, et al. Local motion correction for lung tumors in PET/CT – First results. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 35:1981–1988, 2008
12. Cheng NM, Yu CT, Ho KC, et al. Respiration-averaged CT for attenuation correction in non-small-cell lung cancer. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 36:607–615, 2009
13. Faria SL, Menard S, Devic S, et al. Impact of FDG-PET/CT on radiotherapy volume delineation in non-small-cell lung cancer and correlation of imaging stage with pathologic findings. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 70:1035–1038, 2008
14. Guido A, Fuccio L, Rombi B, et al. Combined ¹⁸F-FDG-PET/CT imaging in radiotherapy target delineation for head-and-neck cancer. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 73:759–763, 2009
15. Zsiray M, Markóczy Zs, Magyar M, et al. A számítógépes rétegvizsgálattal kombinált pozitronemissziós tomográfia (PET-CT) diagnosztikus értéke tüdőrákban (Tapasztalataink 408 beteg kapcsán). *Magyar Onkológia* 53:17–21, 2009
16. Garai I, Borbély K, Barna S, et al. ¹⁸F-FDG PET/CT lymphomákban: a betegség jellegéből adódó értékelési nehézségek és összevetés az irodalmi adatokkal. *Magyar Onkológia* 55:178–186, 2011
17. Borbély K, Sinkovics I, Madaras B, et al. Az emlőrák korszerű képpalkotó diagnosztikája. *Nukleáris medicina technikák. Orvosi Hetilap* 153:14–21, 2012
18. Fülöp M, Kásler M, Remenár É, et al. A PET-CT szerepe az ismeretlen primer tumorok kimutatásában manifeszt nyaki áttétes betegek esetében. *Magyar Onkológia* 56:84–92, 2012
19. Németh Z, Boér K, Kásler M, et al. A ¹⁸F-FDG PET/CT klinikai alkalmazása colorectalis carcinomában. *Orvosi Hetilap* 154:1447–1453, 2013
20. Borbély K, Géczy L, Kásler M. Miért kell a PET/CT az uroonkológiában? *Magyar Onkológia* 57:282–296, 2013
21. Borbély K. Funkcionális képpalkotás az onkológiában. In: Az onkológia alapjai. Egyetemi tankönyv. Szerk. Kásler M. Medicina Könyvkiadó Zrt., Budapest 2011, pp. 229–256
22. Estorch M, Carrio I. Future challenges of multimodality imaging. *Recent Results Cancer Res* 187:403–415, 2013
23. Catana C, Procissi D, Wu YB, et al. Simultaneous in vivo positron emission tomography and magnetic resonance imaging. *Proc Natl Acad Sci USA* 105:3705–3710, 2008
24. Schlemmer HPW, Pichler BJ, Schmand M, et al. Simultaneous MR/PET imaging of the human brain: feasibility study. *Radiology* 248:1028–1035, 2008
25. Hofmann M, Steinke F, Scheel V, et al. MRI-based attenuation correction for PET/MRI a novel approach combining pattern recognition and atlas registration. *J Nucl Med* 49:1875–1883, 2008
26. Zaidi H. Is MR-guided attenuation correction a viable option for dual modality PET/MR imaging? *Radiology* 244:639–642, 2007
27. Woody C, Schlyer D, Vaska P, et al. Preliminary studies of a simultaneous PET/MRI scanner based on the RtaCAP small animal tomograph. *Nucl Instrum Methods A* 571:102–105, 2007
28. Beyer T, Moser E. MR/PET or PET/MRI: does it matter? *MAGMA* 26:1–4, 2013
29. Goyen M, Debatin JF. Healthcare costs for new technologies. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 36(Suppl 1):S139–S143, 2009
30. Kalemis A, Delattre BM, Heinzer S. Sequential whole-body PET/MR scanner: concept, clinical use, and optimisation after two years in the clinic. The manufacturer's perspective. *MAGMA* 26:5–23, 2013
31. Veit-Haibach P, Kuhn FP, Wiesinger F, et al. PET–MR imaging using a tri-modality PET/CT–MR system with a dedicated shuttle in clinical routine. *MAGMA* 26:25–35, 2013
32. Kjær A, Loft A, Law I, et al. PET/MRI in cancer patients: first experiences and vision from Copenhagen. *MAGMA* 26:37–47, 2013
33. Platzek I, Beuthien-Baumann B, Langner J, et al. PET/MR for therapy response evaluation in malignant lymphoma: initial experience. *MAGMA* 26:49–55, 2013
34. Antoch G, Bockisch A. Combined PET/MRI: a new dimension in whole-body oncology imaging? *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 36(Suppl 1):S113–S120, 2009
35. Buchbender C, Heusner TA, Lauenstein TC, et al. Oncologic PET/MRI, part 1: tumors of the brain, head and neck, chest, abdomen, and pelvis. *J Nucl Med* 53:928–938, 2012
36. Buchbender C, Heusner TA, Lauenstein TC, et al. Oncologic PET/MRI, part 2: bone tumors, soft-tissue tumors, melanoma, and lymphoma. *J Nucl Med* 53:1244–1252, 2012
37. Cho ZH, Son YD, Choi EJ, et al. In-vivo human brain molecular imaging with a brain-dedicated PET/MRI system. *MAGMA* 26:71–79, 2013
38. Wagenknecht G, Kaiser HJ, Mottaghy FM, et al. MRI for attenuation correction in PET: methods and challenges. *MAGMA* 26:99–113, 2013
39. Vu NT, Silverman RW, Chatziioannou AF. Preliminary performance of optical PET (OPET) detectors for the detection of visible light photons. *Nucl Instrum Methods* 569:563–566, 2006